

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE

CAMPUS ESTÂNCIA

DIRETORIA DE ENSINO

COORDENADORIA DE ENGENHARIA CIVIL

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

FERNANDO LUÍS DE ANDRADE SANTOS

DESENVOLVIMENTO DE AGREGADO LEVE COM ADIÇÃO DE SERRAGEM

MONOGRAFIA

ESTÂNCIA

2019

FERNANDO LUÍS DE ANDRADE SANTOS

DESENVOLVIMENTO DE AGREGADO LEVE COM ADIÇÃO DE SERRAGEM

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, da Coordenação do Curso de Engenharia Civil, do Instituto Federal de Sergipe – Campus Estância.

Orientador: Prof. Dr. Herbet Alves de Oliveira

ESTÂNCIA

2019

Santos, Fernando Luís de Andrade.
S237d Desenvolvimento de agregado leve com adição de serragem. / Fernando
Luís de Andrade Santos. – Estância, 2019.
59f.; il.

Monografia (Graduação) – Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Sergipe – IFS. Coordenação do Curso de Engenharia Civil.
Orientador: Prof. Dr. Herbet Alves de Oliveira.

1. Agregado sintético. 2. Argila. 3. Serragem. 4. Aproveitamento
de resíduos. I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Sergipe - IFS. II. Oliveira, Herbet Alves de. III. Título.

CDU: 624:691.322

Ficha elaborada pela bibliotecária Ingrid Fabiana de Jesus Silva
CRB 5/1856

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE
CAMPUS ESTÂNCIA
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

TERMO DE APROVAÇÃO

DESENVOLVIMENTO DE AGREGADO LEVE COM ADIÇÃO DE SERRAGEM

FERNANDO LUÍS DE ANDRADE SANTOS

Esta monografia foi apresentada às 15 horas do dia 21 de maio de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Thiago Remacre Munareto
(Instituto Federal de Sergipe)

Prof. Dr. Cochiran Pereira dos Santos
(Universidade Federal de Sergipe)

Prof. Dr. Herbet Alves de Oliveira
(Instituto Federal de Sergipe)
Orientador(a)

Prof. Dr. Carlos Mariano Melo Júnior
(IFS – Campus Estância)
Coordenador(a) da COEC

Dedico este trabalho à minha família,
a quem devo tudo.

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Herbet Alves de Oliveira, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória. Agradeço também ao Dr. Cochiran Pereira dos Santos, pelo auxílio nos ensaios necessários para a produção desse trabalho e ao Prof Dr. Thiago Remacre Munareto pelas contribuições durante a apresentação do projeto desse trabalho.

Aos meus colegas de sala Anny, Jéssica, Kevin, Nilton e Sarah.

A Coordenação do Curso, pela cooperação.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família e namorada, pois sei que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

Eu denomino meu campo de
Gestão do Conhecimento, mas você não
pode gerenciar conhecimento. Ninguém
pode. O que você pode fazer, o que a
empresa pode fazer é gerenciar o
ambiente que otimize o conhecimento.
(PRUSAK, Laurence, 1997)

RESUMO

SANTOS, Fernando Luís de Andrade Santos. **Desenvolvimento de agregado leve com adição de serragem**. 55 páginas. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – Campus Estância. 2019.

Este trabalho tem por objetivo o estudo da viabilidade da utilização de serragem como aditivo em uma mistura com argila do município de Igreja Nova, Alagoas, para produção de argila expandida cuja meta é obter a maior resistência mecânica e menor massa unitária. O resíduo de serragem é utilizado basicamente como combustível em fornos cerâmicos ou na produção de madeira do tipo MDF. Inicialmente foram confeccionados corpos de prova de argila com adição de 5, 10 e 20% de serragem. Em seguida, esses foram submetidos a ensaios de análise química por FRX, índice de plasticidade, matéria orgânica e caracterização mineralógica. Essas formulações foram utilizadas para conformação de agregados com 19 mm de diâmetro e queimados a 1120 °C. Após resfriados, foram submetidos a ensaios de perda ao fogo, resistência à compressão e massa unitária. Foi selecionada a formulação com melhor desempenho nos aspectos massa unitária e resistência à compressão do agregado, a partir da técnica da decisão com vários objetivos. Por fim, com essa formulação foram produzidos corpos-de-prova de concreto e submetidos ao teste de resistência à compressão. Foi observado que a formulação com 5% de serragem apresentou melhores valores de resistência e de massa unitária comparada às outras formulações. Adicionalmente, todas as formulações apresentaram melhores resultados de tensão de ruptura à compressão quando comparadas a argila expandida comercial.

Palavras-chave: agregado sintético, argila, serragem, aproveitamento de resíduos.

ABSTRACT

SANTOS, Fernando Luís de Andrade Santos. **Desenvolvimento de agregado leve com adição de serragem**. 55 páginas. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – Campus Estância. 2018.

This work aims to study the feasibility of the use of sawdust as an additive in a clay mixture of the municipality of Igreja Nova, Alagoas, for the production of expanded clay whose goal is to obtain the highest mechanical strength and lower unit mass. The sawdust residue is used primarily as fuel in ceramic kilns or in the production of MDF-type wood. Initially clay specimens with 5, 10 and 20% sawdust were made. Afterwards, they were submitted to chemical analysis by FRX, plasticity index, organic matter and mineralogical characterization. These formulations were used for conformation of aggregates 19 mm in diameter and burned at 1120 °C. After cooling, they were submitted to tests of fire loss, compressive strength and unit mass. The formulation with the best performance in the unit mass and compressive strength aspects of the aggregate was selected, using the decision technique with several objectives. Finally, with this formulation, concrete specimens were produced and submitted to the compressive strength test. It was observed that the formulation with 5% of sawdust had better values of resistance and of unit mass compared to the other formulations. Additionally, all formulations showed better compression rupture stress results when compared to commercial expanded clay.

Keywords: synthetic aggregate, clay, sawdust, waste recovery.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS DO TRABALHO	14
2.1	OBJETIVO GERAL	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
3.1	ARGILA	15
3.1.1	Caulinita	15
3.1.2	Montmorilonita	16
3.1.3	Ilitas	16
3.1.4	Cloritas	17
3.1.5	Ação Do Calor Sobre Argilas	18
3.1.6	Impurezas Mais Comuns Presentes Nas Argilas	20
3.1.7	Propriedades Físicas Das Argilas	23
3.1.7.1	Plasticidade	23
3.1.7.2	Secagem de materiais cerâmicos	23
3.1.7.3	Composição química das argilas	24
3.2	RESÍDUOS	24
3.2.1	Serragem	26
3.3	ARGILA EXPANDIDA	26
3.3.1	Propriedades Da Argila Expandida	29
3.3.1.1	Forma e textura	29
3.3.1.2	Resistência mecânica	30
3.3.1.3	Porosidade, absorção de água e massa específica.	30
3.4	Concreto Leve	31
3.4.1	Histórico	32
3.4.2	Propriedades Do Concreto Leve No Estado Endurecido	33
3.4.2.1	Resistência à compressão	33
3.4.2.2	Absorção de água e porosidade aparente	35
4	METODOLOGIA	36
4.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	36
4.2	PENEIRAMENTO	36
4.3	ANÁLISE QUÍMICA POR FRX	36
4.4	ÍNDICE DE PLASTICIDADE (IP)	37
4.5	PERDA AO FOGO	37

	10
4.6 MATÉRIA ORGÂNICA	37
4.7 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA	37
4.8 CONFORMAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA E ENSAIOS TECNOLÓGICOS DAS ARGILAS	38
4.9 ENSAIOS TECNOLÓGICOS APÓS QUEIMA	38
4.10 ABSORÇÃO DE ÁGUA (AA) E MASSA ESPECÍFICA APARENTE (MEA)	39
4.11 TENSÃO DE RUPTURA COMPRESSÃO APÓS QUEIMA	39
4.12 PRODUÇÃO DO CONCRETO COM O AGREGADO OBTIDO	39
4.13 ENSAIO DE COMPRESSÃO DE CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS	40
5 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO	41
6 CONCLUSÕES	51

1 INTRODUÇÃO

Segundo Chandra e Berntsson (2002), agregados leves são materiais utilizados na construção civil em substituição as britas, quando se deseja reduzir o peso da estrutura, ou ainda como elementos de proteção acústica e térmica. Os agregados se classificam em leves ou pesados. Os leves se caracterizam por apresentar massa específica menor em relação a outros agregados usualmente empregados no concreto como barita, hematita e britas graníticas e calcárias. Segundo Rossignolo (2011), os agregados leves artificiais ou argila expandida são obtidos em processos industriais. A argila expandida pode ser definida como um agregado leve que se apresenta em elementos cerâmicos, com uma estrutura interna formada por uma espuma cerâmica com microporos e com uma casca rígida e resistente. Suas principais características são: leveza, baixa densidade, isolamento térmico e acústico (CINEXPAN, 2015).

A argila expandida pode ser aplicada ao concreto, substituindo o agregado gráúdo, pois apresenta alta resistência, além de ser mais leve que o agregado gráúdo convencional. Além disso, ela apresenta alta durabilidade, isolamento acústico e térmico, estabilidade dimensional, inércia química e é incombustível (CINEXPAN, 2015). Por ser mais leve, acarreta menor peso estrutural, podendo diminuir dimensões da superestrutura e infraestrutura, trazendo também um viés sustentável. Também é utilizada em outros setores como jardinagem e paisagismo, além de lavanderia e na estonagem de jeans.

Segundo a ABNT NBR 8953, o concreto pode ser classificado em normal, leve e pesado ou denso. O primeiro com massa específica seca compreendida entre 2000 kg/m^3 e 2800 kg/m^3 , o segundo com massa específica seca inferior a 2000 kg/m^3 e o último com massa específica seca superior a 2800 kg/m^3 .

O agregado de argila expandida pode ser produzido por dois processos de fabricação: o primeiro em forno rotativo, onde a matéria-prima passa pelo tratamento térmico após ser triturada, classificada granulometricamente, moída e pelotizada e por fim, moldada. Já o segundo por processo de queima em forno intermitente, pela sinterização, onde o material bem umedecido é carregado por esteiras, sob queimadores, de modo que o calor atinja gradualmente o material (MORAVIA et al., 2006).

Devido a seu processo produtivo, a argila expandida apresenta formato arredondado irregular com uma camada superficial vitrificada, núcleo poroso, com

baixa permeabilidade, mostrando ser um material muito útil para a construção civil. Conforme CINEXPAN (2005), além dessas características, ela apresenta:

- a) Baixa densidade: o formato interno poroso, repleto de vazios, garante ao agregado menor massa.
- b) Resistência/Durabilidade/Estabilidade Dimensional: é um material nada complexo, não exigindo cuidados muito elaborados, podendo sem estocado por muito tempo sem apresentar problemas, não ocasionando por exemplo, deformações. Devido a sua camada vitrificada e a sua estrutura interna de microporos, ela apresenta uma alta resistência à compressão;
- c) Inércia Química: não apresenta substâncias que podem reagir com o concreto, outros agregados ou com as armaduras gerando consequências desfavoráveis. Devido sua alta durabilidade, ela pode ser utilizada também em plataformas marítimas;
- d) Isolamento Térmico: quando aplicado em coberturas de residências, a argila expandida pode reduzir a temperatura interna em até 5 °C. Além disso, por ela isolar a temperatura, faz com que a laje de cobertura não sofra tantas dilatações, diminuindo assim a abertura e a quantidade de fissuras;
- e) Isolamento Acústico: devido ao seu núcleo microporoso e sua camada superficial fechada vitrificada, possui uma elevada capacidade de isolamento acústico;
- f) Resistência a altas temperaturas: devido a sua resistência a altas temperaturas, é utilizada como material refratário;
- g) Redução de Custos: por ser um material mais leve que o agregado convencional, ele torna a estrutura como um todo mais leve, diminuindo as cargas na fundação e trazendo uma economia no concreto utilizado.

Segundo CINEXPAN (2005), a argila expandida pode ser utilizada em diversas áreas com diferentes finalidades:

- a) Isolamento Térmico: em sua forma original, sem compactação ou aditivos, é aplicada como enchimento leve em lajes para trazer conforto acústico e térmico, além de tornar o ambiente mais sustentável e harmônico;
- b) Paisagismo: capaz de manter a umidade adequada do solo, é bastante utilizado em jardinagem, paisagismo e hidroponia, possibilita uma drenagem rápida e bem distribuída por toda a área, facilitando o desenvolvimento de plantas;

- c) Telhado Verde: nesse caso a argila expandida é aplicada para manter estável a umidade da planta, decoração de vasos e jardins, melhorar o enraizamento das plantas e absorver a água da chuva, retardando o escoamento e evitando empoçamento;
- d) Concreto Leve Estrutural: por oferecer uma resistência elevada com baixa densidade, alta durabilidade, menor módulo de deformação em relação ao agregado convencional, fácil trabalhabilidade, se torna um excelente material para ser utilizado em estruturas por permitir o alívio de tensões na mesma;
- e) Geotecnia: a argila expandida atua como um dreno natural, reduzindo o empuxo do terreno em estruturas de contenção, devido a sua durabilidade, ela não se estraga com o decorrer do tempo, além de apresentar fácil compactação;
- f) Enchimento com nata de cimento: utilizada em nivelamento de piso, garantindo aderência e compatibilidade com revestimentos, apresenta secagem rápida, acelerando o processo construtivo do contrapiso e piso acabado.

O agregado leve é produzido em apenas uma unidade fabril no Brasil. Visando viabilizar a disseminação desse produto, propõe-se o desenvolvimento do mesmo com materiais encontrados na região a fim de atrair fabricantes para o produto. Propõe-se também, a adição de serragem, que é um resíduo do corte de madeiras por serras, a fim de contribuir para a redução do impacto ambiental provocado pelo descarte do resíduo, como aditivo para redução da densidade.

2 OBJETIVOS DO TRABALHO

2.1 OBJETIVO GERAL

Produzir agregado leve de argila expandida a partir de argilas utilizadas no segmento de cerâmica no estado de Sergipe, utilizando resíduo de serragem proveniente do processo de beneficiamento de madeira como aditivos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar argilas para utilização na fabricação de agregado sintético;
- Elaborar agregado sintético pelo processo de prensagem;
- Produzir agregado leve de baixa porosidade de modo a não necessitar adicionar água adicional no produto antes da concretagem;
- Executar análise crítica da caracterização física, química e microestrutural de argilas a fim de definir padrões cerâmicos para se produzir um agregado;
- Fabricar concreto com a argila expandida e caracterizar por meio dos ensaios de resistência mecânica, absorção de água e massa específica.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 ARGILA

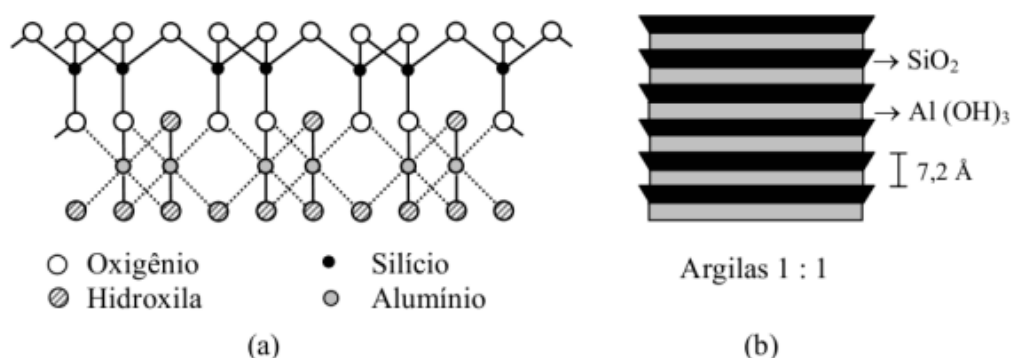
Segundo a ABCERAM (Associação Brasileira de Cerâmica) (2016), argila é proveniente do processo de intemperismo sofrido pelas rochas, por isso é um material natural, de textura terrosa, de granulação fina, constituída essencialmente por uma mistura de argilominerais como: caulinita, illita, montmorilonita e clorita, podendo conter impurezas como quartzo, mica, pirita, hematita, matéria orgânica e/ou outros materiais diferentes dos argilominerais. Os argilominerais são os constituintes característicos da argila; quimicamente são silicatos de alumínio ou magnésio hidratados, contendo em certos tipos outros elementos como ferro, potássio, lítio e outros. Santos (1989) e Gomes (1988), complementam afirmando que argilas são silicatos de alumínio hidratados de estrutura cristalina, dispostos em camadas, constituídos por folhas contínuas de tetraedros de SiO_4 , ordenados de forma hexagonal, condensados com folhas octaédricas de hidróxidos de metais di e trivalentes, cujas partículas geralmente se apresentam abaixo de 2 μm . Devido às dimensões micro ou nanométricas, os microcristais da maioria dos argilominerais só podem ser visualizados por microscopia eletrônica de transmissão (MET); alguns podem também ser observados por microscopia eletrônica de varredura (MEV) (COELHO et al., 2006).

Quando úmida, a argila desenvolve outra gama de características como: resistência mecânica a úmido, retração linear de secagem, compactação, tixotropia, viscosidade de suspensões aquosas e principalmente plasticidade, propriedade essencial para conformação de produtos cerâmicos (ABCERAM, 2016).

3.1.1 Caulinita

O argilomineral caulinita é formado pelo empilhamento regular de camadas 1:1 em que cada camada consiste de uma folha de tetraedros SiO_4 e uma folha de octaedros $\text{Al}_2(\text{OH})_3$, também chamada de folha de gibsita (SANTOS, 1989, p. 58), conforme Figura 1b e a Figura 1a, apresenta estrutura cristalina constituída pelos elementos Si, Al, O e H. Devido ao argilomineral apresentar baixa plasticidade, argilas constituídas em sua maioria por caulinita tem sua utilização na produção de cerâmica limitada, por conta da dificuldade na conformação.

Figura 1 - Estrutura de uma caulinita.

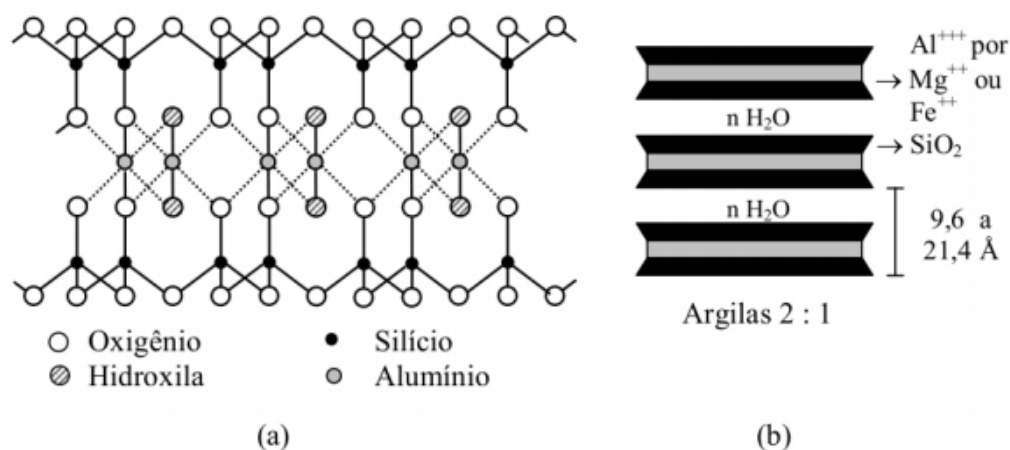


Fonte: Santos (1989)

3.1.2 Montmorilonita

A estrutura cristalina dos argilominerais montmorilonitas é composta por Si, Al e O, conforme Figura 2a e por duas folhas de silicatos tetraédricas, com uma folha central octaédrica, unidas entre si por oxigênios, vide Figura 2b. A principal característica desse argilomineral é a capacidade de absorver moléculas de água (BARBA, 1997; SANTOS, 1989).

Figura 2 - Estrutura cristalina de uma argila montmorilonítica.



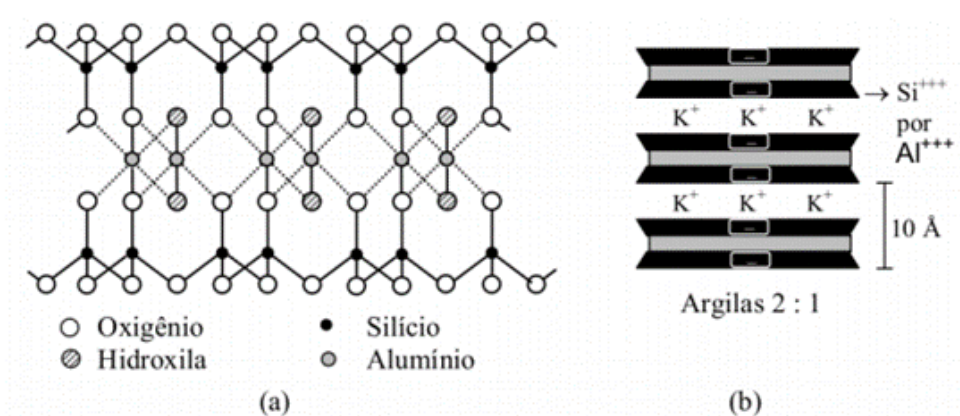
Fonte: Barba(1997)

3.1.3 Ilitas

O argilomineral ilita tem sua estrutura cristalina muito semelhante à da montmorilonita, no entanto, há uma substituição maior de alumínio por silício, Figura 3a (SANTOS, 1989). Segundo Gomes (1988), as ligações quebradas das extremidades das camadas fornecem ao argilomineral capacidade de absorção de água. A ilita obtém propriedades próximas as das montmorilonitas quando a

substituição do silício das camadas tetraédricas por alumínio for pequena, podendo tornar as ligações entre as unidades estruturais proporcionadas pelos cátions K deficientes e então permitindo a entrada de água. O esquema estrutural das ilitas está representado na Figura 3b.

Figura 3 - Estrutura cristalina de uma ilita.

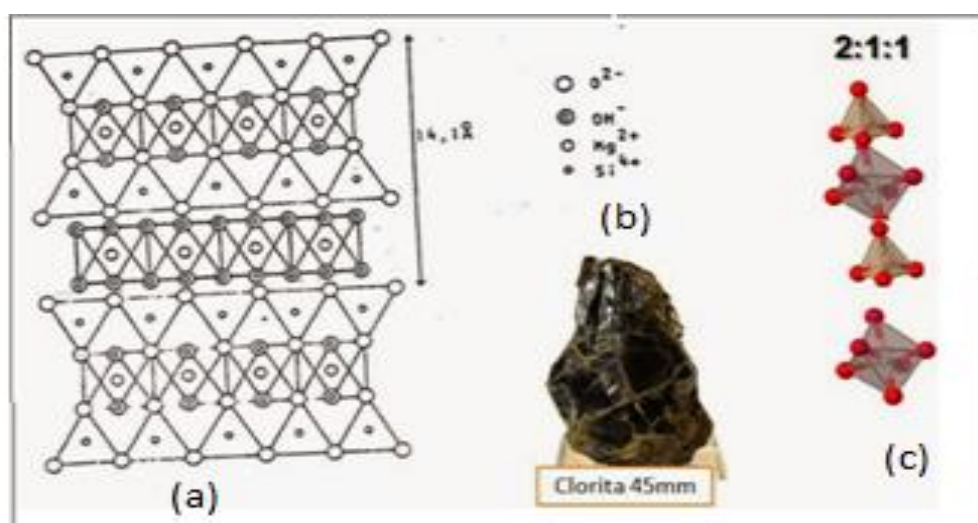


Fonte: Barba (1997)

3.1.4 Cloritas

Segundo Santos (1989) o argilomineral clorita é encontrado na natureza intimamente misturado com outros argilominerais, dificultando o estudo de um material puro. A estrutura cristalina do material é constituída por quatro capas de silicatos de alumínio e magnésio hidratados, contendo Fe(II) e Fe(III) conforme apresentado na Figura 4a. Ela apresenta cores variadas, vide Figura 4b e estrutura tetragonal conforme Figura 4c.

Figura 4 - Estrutura cristalina de uma clorita



Fonte: Barba (1997)

Segundo Barba (1997), os interestratificados são a classificação, de acordo com o subgrupo e espécie mineralógica, dos argilominerais mais comuns. Os interestratificados são subdivididos conforme classificação do Quadro 1:

Quadro 1 - Subgrupos de argilominerais

Subgrupo	Espécie química	Minerais mais comuns
Caulim $X_n(Y_2O_5)(OH)_4$	Caulinita	Nacrita $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$ DiKita $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$ Livesita $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$ Halloysita $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$
Mica XB (Y_2O_5) $(OH)_2Z_m H_2O$	Montmorilonitas	Montmorillonitas $(Al_{1,51}Fe_{0,07}Mg_{0,60}Al_{0,28}Si_{3,72})O_{10}(OH)_{2Na_{0,33}}$ Beidelita $(Al_{1,46}Fe_{0,50}Mg_{0,08}Al_{0,36}Si_{3,64})O_{10}(OH)_{2Na_{0,40}}$ Nontronita $1,67Mg_{0,33}(Si_4O_{10})(OH)_{2Na_{0,33}}$ e $Fe_{2,22}(AlSi_3O_{10})(OH)_{2Na_{0,33}}$ Hectorita $Mg_{2,67}Li_{0,33}(Si_4O_{10})(F,OH)_{2Na_{0,33}}$ Saponita $Mg_3(Al_{0,33}Si_{6,67})O_{10}(OH)_{2Na_{0,33}}$
	Ilitas	Grande variedade de minerais
Cloritas $X_{2n}(Y_2O_5)_2(OH)_2$	Cloritas	Clorita $[Mg_2(Al,Fe(III)(OH)_6)[Mg_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2]$

Fonte: Barba (1997)

3.1.5 Ação Do Calor Sobre Argilas

De acordo com Cizeron (1979) e Mackenzie (1959), citados por Oliveira (2017), a matéria-prima ao sofrer aumento de temperatura passa por variações volumétricas, possivelmente imutáveis, qualificadas em: oxidação de matéria orgânica, decomposição de compostos que contem oxigênio, como sulfatos, carbonatos, desidroxilação do mineral argiloso, cristalização ao aumentar a temperatura e formação de fase vítrea.

- Caulinita: conforme observado na Figura 5, a análise térmica diferencial apresenta as reações mais comuns da caulinita (Cizeron, 1979 e Mackenzie, 1959 apud OLIVEIRA, 2017). No intervalo entre 560 e 590 °C há a eliminação de hidroxilas da água de composição presente no material, causando um pico

endotérmico. Entre 980 e 1000 °C, entre a alumina e a sílica, ocorre uma reação gerando a mulita, ocasionando um pico exotérmico. As reações são apresentadas em (1) e (2):

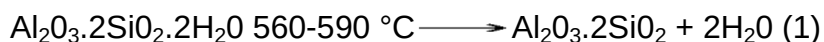
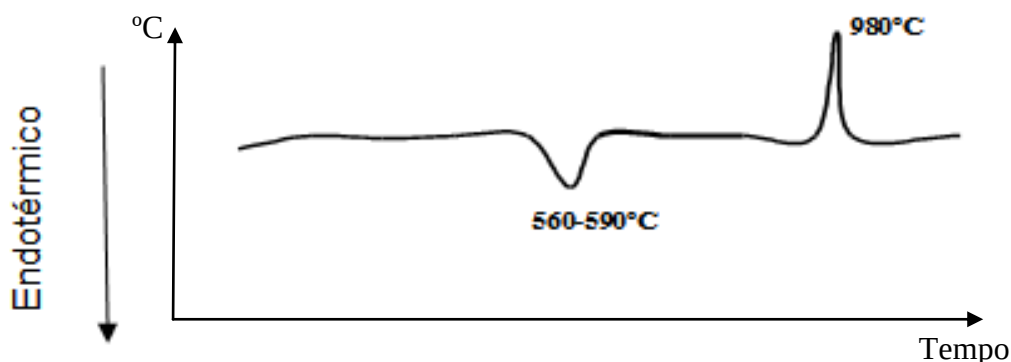


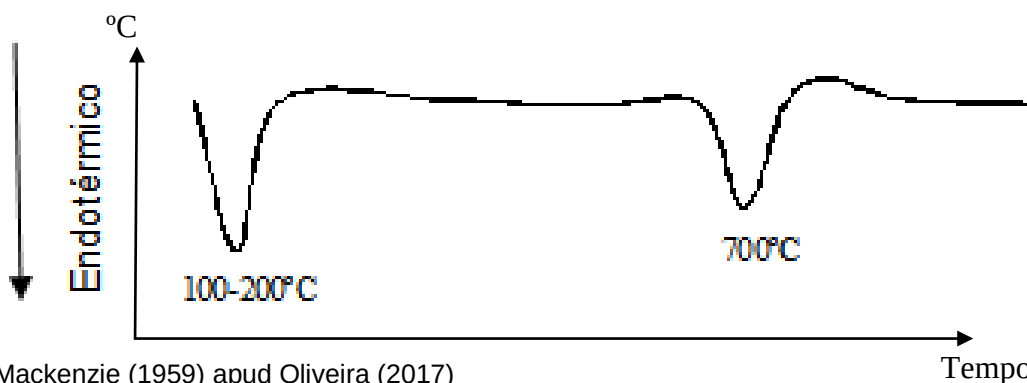
Figura 5 - Análise térmica diferencial de uma argila caulinítica



Fonte: Mackenzie (1959) apud Oliveira (2017)

- Montmorilonita: conforme apresentado pela Figura 6, a análise térmica diferencial expõe as reações mais comuns da montmorilonita, onde inicialmente entre 100 a 200 °C a água absorvida é eliminada, causando um pico endotérmico. Em seguida, aos 700 °C as hidroxilas da água de composição também são eliminadas originando outro pico endotérmico. Por fim, aos 850 °C, com a perda de cristalinidade do material, pode acontecer um pequeno pico endotérmico (MACKENZIE, 1959 apud OLIVEIRA, 2017).

Figura 6 - Análise térmica diferencial de uma argila montmorilonítica



Fonte: Mackenzie (1959) apud Oliveira (2017)

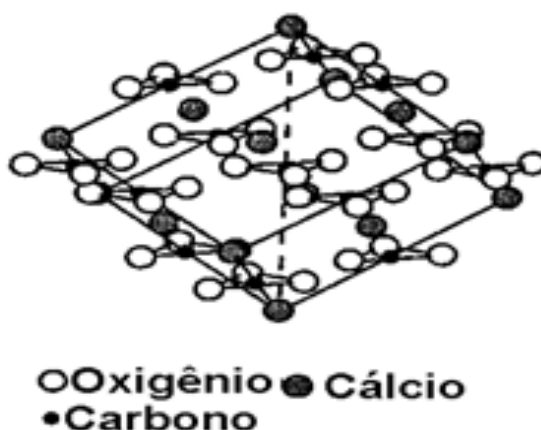
- Ilitas: por ser encontrado na natureza intimamente misturado com outros argilominerais, o estudo do material puro é mais difícil (SANTOS, 1989). Por

ser encontrado com grande quantidade de impurezas, a definição exata da sua composição é dificultosa.

3.1.6 Impurezas Mais Comuns Presentes Nas Argilas

- Calcitas: é um mineral secundário, originária da decomposição de silicatos das rochas ígneas. Pode ser encontrado puro ou contendo impurezas como: ferro, manganês substituindo o cálcio. Em forma molecular CaCO_3 e estrutura composta por cristais hexagonais-R conforme Figura 7 (HURLBUT, 1974 apud OLIVEIRA, 2017).

Figura 7 - Estrutura cristalina de uma calcita



Fonte: Hurlbut (1974) apud Oliveira (2017)

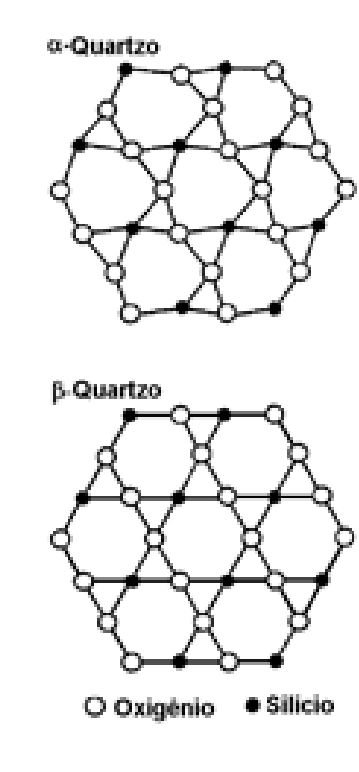
Segundo Barba (1997), a calcita auxilia na absorção de água e diminui a retração linear. Por outro lado, ao atingir temperaturas elevadas ela pode destruir fases previamente formadas, gerando novamente a fase vítrea de baixa viscosidade.

- Matéria orgânica: de acordo com Santos (1989), a matéria orgânica mais comum encontrada nas argilas são folhas de árvores misturadas as argilas, formando um material com cor escura. Barba (1997) complementa afirmando que para a produção de cerâmicas de ciclo rápido, a concentração de matéria orgânica deve ser menor que 0,3% para evitar a formação do coração negro. Santos (1989) define coração negro como um núcleo negro no interior das peças cerâmicas, que gera inchamentos e deformações de peças queimadas. No entanto, esse “defeito” é essencial para agregados leves sintéticos, já que a matéria orgânica promove a expansão do agregado o que leva a redução de

densidade, provando-se fundamental no processo de produção de agregado leve sintético.

- Quartzo: conforme Figura 8, o quartzo tem estrutura de cristais prismáticos (Figura 8), com as faces do prisma estriadas horizontalmente e sua fórmula química é: SiO_2 (MACKENZIE, 1959 apud OLIVEIRA, 2017). De acordo com Barzaghi (1983) e Novaes (1999) apud Oliveira (2017), o quartzo tem como funções no material cerâmico: reduzir a plasticidade, facilitando a saída de gases durante a secagem e queima; diminuir a retração de secagem e queima; aumentar o coeficiente de dilatação térmica; reduzir a resistência mecânica após secagem e queima; auxiliar na formação de eutéticos com consequente formação de fase líquida que contribui para obter-se a resistência mecânica e porosidade desejada. O quartzo na argila deve apresentar granulometria fina, grãos maiores dificultam a moagem, aumentando o tempo necessário para redução da granulometria.

Figura 8 - Estrutura cristalina do quartzo

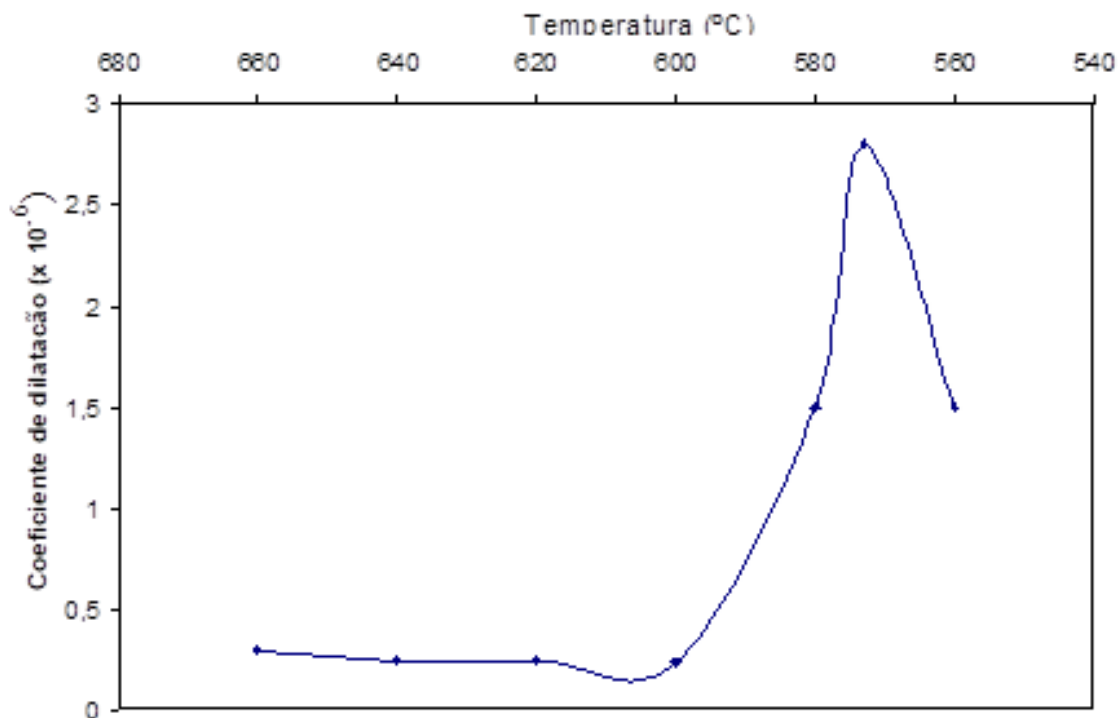


Fonte: Mackenzie (1959) apud Oliveira (2017)

Segundo Oliveira (2017), de acordo com a mudança de formas do quartzo, ele apresenta variações volumétricas rápidas e reversíveis. Conforme Figura 9, a 573 °C, o quartzo aumenta de volume e passa da forma α para a forma β durante o aquecimento, ao chegar aos 564 °C, no resfriamento, o quartzo volta ao seu estado

inicial, devido a essa transformação alotrópica, deve-se ter cuidado no processo produtivo de peças cerâmicas para evitar o surgimento de trincas no material final.

Figura 9 - Análise dilatométrica mostrando a mudança da forma alotrópica do quartzo de α para β



Fonte: Mackenzie (1959) apud Oliveira (2017)

- Feldspato: segundo Mahmoudi et al. (2017), são silicatos de alumínio contendo potássio, sódio, cálcio e, raramente, bário. É uma matéria-prima não plástica, que atua como fundente, abaixando o ponto de fusão do material, reagindo com a sílica e alumina presentes nas outras matérias-primas, ajudando na formação de fases vítreas, conferindo resistência mecânica após a queima e reduzindo a absorção de água. Os feldspatos não apresentam grandes variações volumétricas durante a queima até a fusão, quando observados em ensaios de DTA.
- Hematita: segundo Mahmoudi et al. (2017), hematita é uma das formas que o ferro pode estar presente nas argilas. Boussen (2016) afirma que o Fe_2O_3 , é formado durante a sinterização e condições de oxidação a partir das reações dos minerais de ferro presentes nas argilas, conferindo uma cor avermelhada características de materiais cerâmicos.

3.1.7 Propriedades Físicas Das Argilas

3.1.7.1 Plasticidade

A NBR 7250/82, define plasticidade como propriedade, em que o solo após ser submetido a grandes deformações permanentes, não apresenta ruptura, fissuras ou grande variação volumétrica. Ou seja, um material plástico, pode ser deformado várias vezes e no fim, manter sua forma inicial após o final do carregamento. Segundo Andrade (2011), essa propriedade está relacionada a forma, tamanho e disposição das partículas, composição de argilominerais, presença de sais solúveis e matéria orgânica. Domenech (1994), diz que a plasticidade ótima é a mínima necessária para não causar defeitos nas peças cerâmicas durante ou após a queima como deformações, baixa resistência mecânica.

Plasticidade muito alta causa uma elevada retração por secagem ou trincas durante a queima, no intervalo de temperatura onde ocorre a desgaseificação da matéria orgânica. O índice de plasticidade ideal para prensagem de peças cerâmicas é entre 15 e 30% (QUAHABI, DAOUDI e FAGEL, 2015). Maestrelli et al. (2013) define a classificação do índice de plasticidade (IP) como: índice de plasticidade baixo quando $IP < 7\%$; plasticidade média quando $7\% < IP < 15\%$; plasticidade alta quando $IP > 15\%$.

3.1.7.2 Secagem de materiais cerâmicos

Ao fim do processo de moldagem, as peças finais passam pelo processo de secagem, que pode acontecer natural ou mecanicamente, como por exemplo ao ar livre e em estufa, respectivamente. Importante frisar que a peça cerâmica sempre sofre uma taxa de retração durante o processo de secagem que varia conforme o tipo de argila, assim como o tempo necessário para a secagem total da peça. O processo de secagem é importante para a eliminação da água absorvida pela peça durante o processo de conformação, a fim de obter uma plasticidade adequada para a conformação. A água é eliminada através da evaporação pela ação do calor, seja através de uma corrente de ar ou pela temperatura elevada produzida pela estufa. Durante a secagem, são eliminados dois tipos de água provenientes da conformação, a água intersticial, necessário para preencher os poros das partículas

e a água livre ou de plasticidade. (NORTON, 1975, BELTRAN et al., 1995 e SLEVIM, 2002).

Para Meseguer (2010), é importante para evitar o surgimento de danos microestruturais, como microfissuras, programar a curva de secagem da peça, para isso, são necessários a definição de parâmetros de secagem e o conhecimento das características tecnológicas das argilas. A retração está relacionada ao índice de plasticidade - quanto maior o índice de plasticidade, mais difícil será a secagem -, presença ou não de minerais inertes na composição da argila em questão e a capacidade da argila absorver água quando exposta a uma atmosfera com umidade relativamente controlada.

3.1.7.3 Composição química das argilas

Segundo Cabral (2008) e Santos (1989), o dióxido de silício (SiO_2) pode estar presente nas argilas combinado com outros óxidos, como acessórios na forma livre ou desenvolvendo fases cristalinas. O óxido de alumínio (Al_2O_3) pode indicar maior concentração de argilominerais, que pode levar o aumento do índice de plasticidade dos solos ou ainda, quanto maior seu índice, maior a refratariedade da argila. O óxido de ferro (Fe_2O_3), oferece a cor avermelhada ao material, tanto antes como depois da queima, em concentrações acima de 5% indica que a argila é fundente. Santos (1989), afirma que os álcalis, óxido de potássio e óxido de sódio ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) em concentração acima de 3% funcionam como fundentes, diminuindo a temperatura de sinterização. Oliveira (2017) constata que o óxido de cálcio (CaO) originado pelos carbonatos, é um material fundente, porém, a perda ao fogo da dissociação do CO_2 pode comprometer a ação do material como fundente, prejudicando a sinterização das argilas devido a geração de poros.

Cabral (2008), define a faixa de composição química que uma argila com finalidade de produção de agregado sintético deve ter: (%) SiO_2 de 50 a 65, (%) Al_2O_3 de 16 a 20, (%) CaO de 1 a 4, (%) Fe_2O_3 de 5 a 9, (%) MgO de 1,5 a 3,5.

3.2 RESÍDUOS

A NBR 10004, define resíduos sólidos como:

“resíduos no estado sólido ou semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e

instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004, p. 1).

Ainda segundo a norma, resíduos sólidos são classificados em:

- Resíduos classe I – Perigosos: são resíduos que possuem características como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade
- Resíduos classe II A – Não inertes: aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I – Perigosos ou de resíduos classe II B – Inertes. Os resíduos classe II A, tem propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
- Resíduos classe II B – Inertes: são resíduos que quando submetidos a contato com água não interferem nos padrões de potabilidade da água, exceto aspectos como cor, turbidez, dureza e sabor.

Durante o processo de fabricação das cerâmicas são aproveitados diversos resíduos de variados segmentos industriais, a fim de reduzir custos nos processos de tratamento e destinação desses resíduos, bem como os impactos ambientais causados pelo descarte desses resíduos na natureza. Christogerou (2009) analisou o reaproveitamento do boro, resíduo da produção de bora, com função de fundente a fim de reduzir a temperatura de sinterização das peças. Com a mesma finalidade, Volland (2014), analisou o reuso de lama proveniente da fabricação de britas, devido a presença de óxidos fundentes. Já Moravia (2006), Cabral (2008), Bui (2013) e Bernhard et al. (2014) analisaram a aplicação de materiais como lama galvânica e lama de esgoto, a fim de inertizá-los. Santis (2012), estudou a influência da substituição da argila plástica pela cinza de serragem em peças de cerâmica vermelha, que resultou em uma boa absorção de água, uma retração linear pouco variante.

Reciclagem traz benefícios como: a diminuição da poluição do solo, água e ar; diminui a sujeira em espaços urbanos e aumenta a qualidade de vida dos habitantes; contribui para a vida útil de aterros sanitários; melhora a composição de compostos orgânicos; gera emprego com o tratamento de recicláveis e renda com a comercialização dos mesmos (OLIVEIRA, 2017).

3.2.1 Serragem

Segundo Fontes (1994), resíduos de madeira é tudo que sobra de um processo produtivo industrial ou exploração florestal. Ele ainda classifica os resíduos de madeira em três tipos: serragem, cepilho e lenha. Serragem é o resíduo originário do corte de madeira por serras, composto por pequenas lascas e pó de madeira, encontrado em todos os tipos de indústrias, a exceção das laminadoras. Cepilho ou maravalha é gerado pelas plainas nas indústrias de serraria e beneficiamento de madeiras, já lenha é o resíduo de maiores dimensões, gerados em todos os tipos de indústrias. A serragem é um material heterogêneo, pois apresenta uma grande variedade de formas e de granulometria, apresenta baixa densidade e alto teor de umidade.

O reaproveitamento de resíduos de madeira, como a serragem, é um tema de grande importância tecnológica e ambiental. Segundo Fagundes (2003), os melhores índices de aproveitamento de toras de madeira serrada se estabelecem entre 35% e 55%. Segundo Dutra e Nascimento (2005), serragem representa 15,7% do total de resíduo gerado pela indústria madeireira motivando assim, o estudo de aplicações para o aproveitamento de tais resíduos. O presente trabalho de conclusão de curso pretende contribuir para buscar uma solução tecnológica viável para o descarte final deste abundante material de resíduo sólido. O processo produtivo da argila expandida valoriza o reaproveitamento de diversos resíduos, entre eles a serragem que pode contribuir para a redução da massa específica em função da sua volatilização até 600 °C (SILVA, 2017).

3.3 ARGILA EXPANDIDA

Segundo Rossignolo (2011), os agregados leves artificiais ou argila expandida são obtidos em processos industriais. A argila expandida pode ser definida como um agregado leve que se apresenta em elementos cerâmica, com uma estrutura interna formada por uma espuma cerâmica com microporos e com uma casca rígida e resistente. Ela também pode ser entendida como um conjunto de grãos naturais ou manufaturados, com diferentes granulometrias, que se sinterizam em temperaturas na faixa de 1100 °C e 1350 °C. O agregado sintético é produzido através de argilas ou é derivado de resíduos que geralmente tem peso específico menor ao do agregado convencional como a pedra britada (OLIVEIRA, 2017). Argila expandida pode ser composta por matérias-primas naturais tais como

vermiculita, argila, ardósia, folhelhos e/ou resíduos. Esses constituintes apresentam composição, geralmente, de 7 a 8% de hematite ou óxido de ferro (Fe_2O_3), a concentração de alumina ou óxido de alumínio (Al_2O_3) fica abaixo de 25%, os carbonatos tem concentração de 1 a 3%, além desses elementos, pode haver sulfatos e matéria orgânica, além disso, o pH é acima de 5 (GOMES, 1988; SANTOS, 1989).

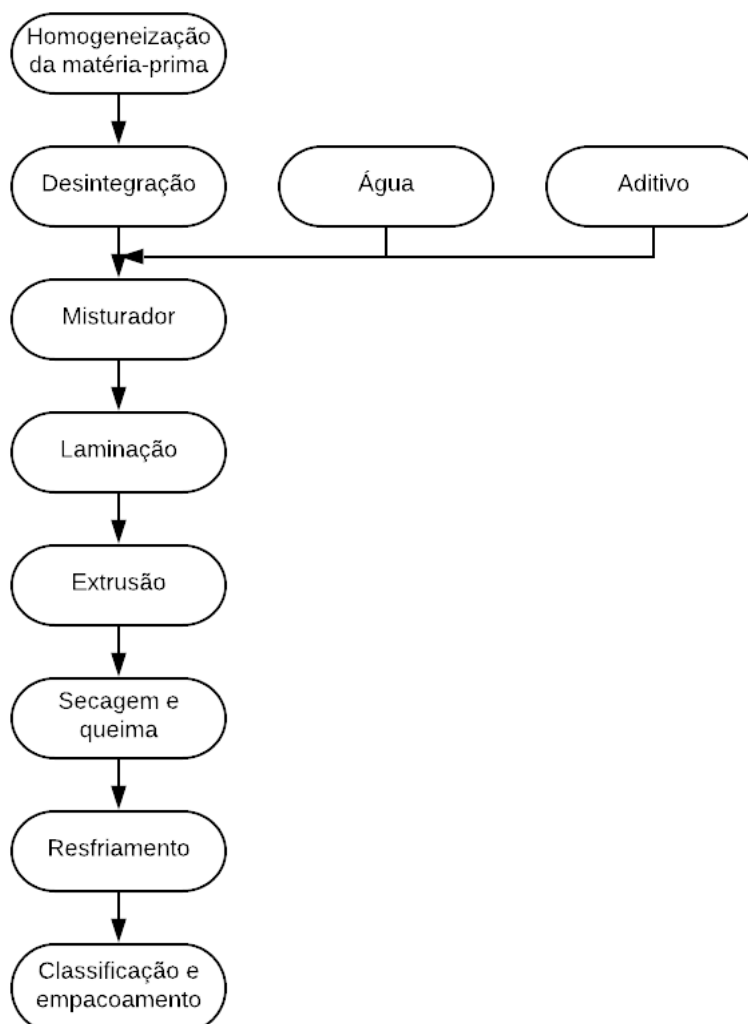
O agregado sintético deve apresentar densidade aparente entre 560 e 880 kg/m^3 , conforme norma DNER-EM 230/94 sobre aplicação de agregado sintético em estradas. Além de ter seu peso aparente situado nessa faixa, o agregado sintético, deve apresentar alta resistência mecânica, baixa porosidade e formato irregular, este último, que pode alterar o consumo de água, e, portanto, a resistência mecânica do material.

Segundo Moravia (2006), a argila expandida pode ser utilizada como agregado graúdo para produção de concreto leve, afim de reduzir os esforços nas estruturas, gerando uma economia no uso de concreto. Obtida através da mistura de alguns tipos de argila e aquecida a uma temperatura em torno de 1200 °C, ela expande em até sete vezes seu volume original. Após o final do processo, a argila expandida toma uma forma arredondada, com uma camada vitrificada externa com baixa porosidade e interiormente uma estrutura porosa. Essa estrutura porosa foi adquirida no processo de aquecimento do material, onde uma parte da argila funde enquanto a outra parte decompõe quimicamente, liberando gases que são incorporados com a parte da argila que se sinterizou, tornando assim o material final com a massa específica menor que no início do processo.

Santos et. al (1989), descreve o processo de produção da argila expandida em oito passos, Figura 10. Primeiro ocorre a homogeneização da matéria-prima, em seguida ocorre a desintegração, reduzindo o tamanho dos torrões a um diâmetro máximo de 5 cm, os torrões são levados para o misturador, onde ocorre a correção da água, se necessário são utilizados aditivos para melhorar a trabalhabilidade da argila ou para aumentar sua expansão durante o processo. A mistura de argila segue para o laminador, onde passará por duas peças cilíndricas afim de eliminar os torrões, preparando o material para a extrusão. Nessa parte do processo, a mistura passa por moldes cilíndricos e em seguida ocorre o corte da mesma para alcançar o tamanho final desejado do agregado. Essas peças então passam pela secagem e queima no forno rotativo, geralmente sob temperaturas entre 1000 e 1350 °C, quando saem do forno, passam por um cilindro no qual é

soprado ar por ventiladores. O material já resfriado passa por peneiras vibratórias para separar a granulometria e, por fim, ocorrer o empacotamento para comercialização.

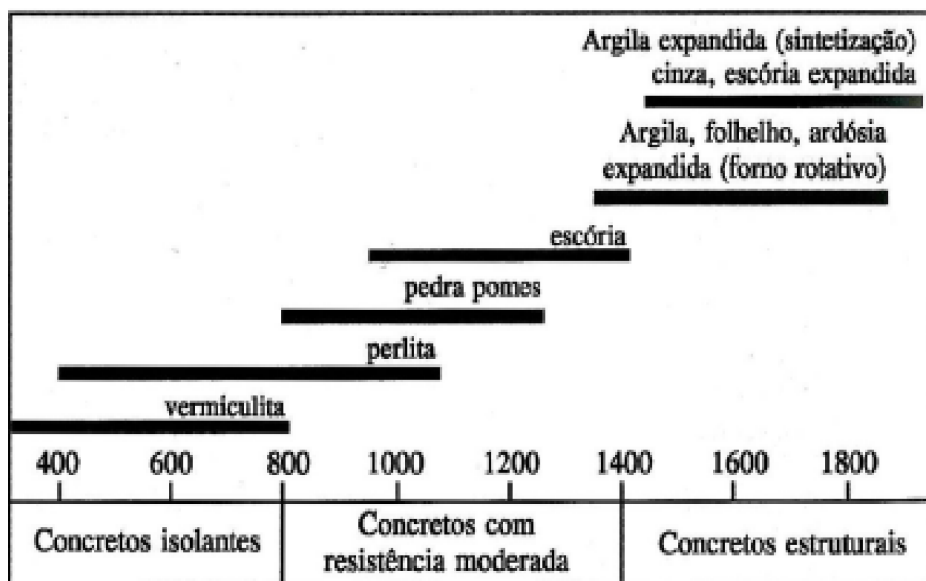
Figura 10 - Processo de produção da argila expandida.



Fonte: Santos et. al (1986)

Para Rossignolo (2009), as características mais importantes para qualificar o agregado são a resistência a compressão, massa específica e porosidade. A classificação dos agregados (Figura 11) acontece de acordo com a densidade, matéria-prima e aplicação (ROSSIGNOLO, 2011).

Figura 11 - Classificação de agregados



Fonte: Rossignolo (2011)

Vários materiais são adicionados a argila afim de diminuir a densidade do material, Santos (2016) utiliza a cinza da serragem derivada do processo de queima de fábricas de cerâmicas, obtendo como resultado um material com uma boa absorção de água e uma retração linear pouco variante. Takahashi (2006), estudou a adição de escória de alumínio, rejeito da indústria recicladora de alumínio, atualmente em valor agregado, na fabricação de argila expandida, no entanto, não obteve valores de resistência a compressão altos. Já Moreno (2012), analisou a utilização de argilas com bastante matéria orgânica, garantindo ao material características naturais ótimas para a produção de argila expandida, ao final do estudo, obteve um material mais barato que o oferecido pelo mercado, já que a preparação dele é mais simples, com densidade aproximada de $0,5 \text{ g/cm}^3$ ou menor. Santis (2015) produziu agregado sintético de argila com o objetivo de obter características próximas as das brita, como resultado alcançou uma resistência a compressão de 35 MPa.

3.3.1 Propriedades Da Argila Expandida

3.3.1.1 Forma e textura

A textura e o formato final do agregado são afetados pela matéria-prima utilizada e pelo processo produtivo. Geralmente o agregado apresenta formato arredondado, cúbico ou irregular, e sua textura pode ser muito ou pouco porosa (HOFF, 2002).

O processo de sinterização acaba dando ao produto final formatos irregulares e muito porosos, ou seja, o agregado acaba absorvendo bastante água, “roubando” água da mistura afetando assim a trabalhabilidade e a resistência do concreto. Por outro lado, aumenta a aderência entre a pasta cimentícia e o agregado, porém, a penetração da pasta nos poros acaba aumentando o consumo de cimento ($30 \text{ a } 100 \text{ kg/m}^3$) da mistura. Por outro lado, o agregado produzido no forno rotativo adquire, ao fim do processo, formato arredondado e uma camada externa vitrificada pouco porosa, que diminui a permeabilidade e a absorção de água, consequentemente melhorando a manutenção da trabalhabilidade (ROSSIGNOLO, 2011).

3.3.1.2 Resistência mecânica

Para Santos (1989), a resistência mecânica do material é influenciada pela presença de óxidos alcalinos, óxido de silício (SiO_2) e óxido de alumínio (Al_2O_3) que auxiliam na formação da fase vítrea, após o processo de queima, além da curva de queima e das condições de resfriamento. Chandra (2002), destaca que a porosidade influi diretamente na resistência mecânica, ou seja, maior porosidade, menor resistência. No entanto, o que mais interfere na resistência é o tamanho e a distribuição dos poros. Para o mesmo volume de vazios, a resistência é menor no material que apresenta poros maiores em comparação ao material que apresenta poros menores na sua estrutura. Rossignolo (2011), afirma que a resistência a compressão é a característica principal do agregado, já que ele deve ser resistente o bastante para aturar os esforços aplicados sobre ele pela estrutura solicitante.

3.3.1.3 Porosidade, absorção de água e massa específica.

Hoff (2002), destaca que a grande quantidade de poros que acaba conferindo ao agregado sua redução de massa, também afeta na absorção de água. Após 24 horas com o agregado leve imersivo em água, ele absorve de 5 a 25% do seu peso em água, ao passo que os agregados convencionais absorvem apenas 2% no mesmo período de tempo.

Devido a sua estrutura interna porosa, o agregado obtido apresenta uma massa específica menor, porém acaba absorvendo uma boa quantidade de água, mostrando-se um complicador no seu emprego na produção de concreto. Portanto, recomenda-se a pré-saturação para evitar prejuízo da trabalhabilidade do concreto

no estado fresco e evitar a formação de bolhas ao redor do agregado (ROSSIGNOLO, 2009). No entanto, ele ainda afirma também, que apesar de desvantagens como aumento da retração por secagem, aumento da massa específica e redução da resistência ao fogo, a absorção de água melhora as propriedades na zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento.

Segundo Chandra (2002), há dois tipos de poros presentes no interior do agregado. Os fechados, poros isolados na estrutura interna que não se conectam com outros poros ou o exterior, contribuindo para a impermeabilidade do material e os poros interconectados, que favorecem a permeabilidade do agregado.

3.4 CONCRETO LEVE

O principal objetivo da substituição do concreto convencional pelo concreto leve é reduzir o maior esforço aplicado sobre uma estrutura de concreto, ou seja, seu próprio peso. Isso se torna ainda mais evidente em estruturas de grande porte, como pontes ou edifícios de múltiplos pavimentos, onde a estrutura produzida com concreto leve tem seu peso total consideravelmente inferior quando comparada a mesma estrutura produzida com concreto convencional. Por reduzir o peso total da estrutura, conseqüentemente, diminui os esforços gerados na estrutura da fundação (ROSSIGNOLO, 2009).

O concreto leve é obtido quando o agregado convencional é substituído totalmente ou parcialmente pelo agregado leve. O concreto leve é um material difundido em todo o mundo, sendo utilizado em prédios pré-fabricados, pontes e até plataformas marítimas. A utilização desse material gera diversas economias durante o processo executivo de uma estrutura de concreto, como economia na fundação da estrutura devido à redução nos esforços aplicados a estrutura, economia em fôrmas e cimbramento, economia no custo do transporte e montagem de peças pré-fabricadas e economia na armadura aplicada na estrutura. (ZHANG e GJφRV, 1991; HOLM e BREMNER, 1994; ROSSIGNOLO, 2003; ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2005; ROSSIGNOLO, 2009).

Segundo a ABNT NBR 8953, o concreto pode ser classificado em normal, leve e pesado ou denso. O primeiro com massa específica seca compreendida entre 2000 kg/m^3 e 2800 kg/m^3 , o segundo com massa específica seca inferior a 2000 kg/m^3 e o último com massa específica seca superior a 2800 kg/m^3 .

Já a ACI 213-R03 (2003), define que o concreto leve estrutural deve apresentar uma resistência à compressão acima de 17 MPa e massa específica aparente na faixa de 1120 a 1920 kg/m^3 com 28 dias de idade.

Por outro lado, a NM 35 (1995), faz uma associação entre a resistência à compressão do concreto leve com valores máximos de massa específica aparente, representados na Tabela 1. Ela ainda complementa, afirmando que os agregados destinados para produção de concreto leve devem ter massa unitária no estado solto inferior a 1120 kg/m^3 para agregados miúdos e 880 kg/m^3 para agregados graúdos.

Tabela 1 - Valores de resistência à compressão de acordo com a massa específica aparente do concreto

Resistência a compressão aos 28 dias (MPa)	Massa específica aparente (kg/m^3)
28	1840
21	1760
17	1680

Fonte: NM (1995)

3.4.1 Histórico

As primeiras aplicações de concreto leve conhecidas foram feitas pelos romanos, nos períodos da República Romana, Império Romano e Império Bizantino. Eles utilizaram concreto leve com pedra-pome como agregado na cobertura em formato de abóbada com 44 metros de diâmetro do Panteão e no Coliseu de Roma, onde o concreto leve, aplicado na estrutura e em diversas paredes, foi obtido com aglomerante à base de cal e rochas vulcânicas (ACI 213R-03, 2003). Ao fim do Império Romano, a aplicação de concreto leve reduziu, voltando a avaliada no século XX com a fabricação de agregado leves sintéticos. o concreto leve voltou a ser utilizado com propósito estrutural no ano de 1922, na construção do ginásio da escola Westport High School, Kansas, devido ao solo não ser suficientemente resistente para suportar uma estrutura de concreto

convencional, portanto, a material escolhido para construção do ginásio foi o concreto com agregado leve (ESCSI, 1971).

O concreto leve estrutural voltou a ser utilizado na construção de múltiplos pavimentos em 1929, na ampliação do prédio da Southwestern Telephone Company, o prédio contava com 14 pavimentos e seria ampliado, inicialmente para 22, no entanto, com o emprego do concreto leve estrutural, o prédio pôde ser ampliado para 38 pavimentos, dobrando o tamanho inicial.

Já o primeiro prédio inteiramente de concreto leve estrutural, foi construído no mesmo ano, mas na cidade de St. Louis, nos Estados Unidos. O Hotel Chase-Park Plaza (Figura 12), com 28 andares. A utilização do concreto leve foi disseminada após o fim da Segunda Guerra Mundial, quando os países afetados pela mesma precisaram se reconstruir (ROSSIGNOLO, 2009).

Figura 12 - Hotel Chase-Park Plaza



Fonte: Rossignolo (2011)

No Brasil, na cidade de Jundiaí, a empresa Cinasita começou a produzir argila expandida no ano de 1968, para aplicação de peças pré-fabricadas e mais tarde, na construção de residências (ROSSIGNOLO, 2009).

3.4.2 Propriedades Do Concreto Leve No Estado Endurecido

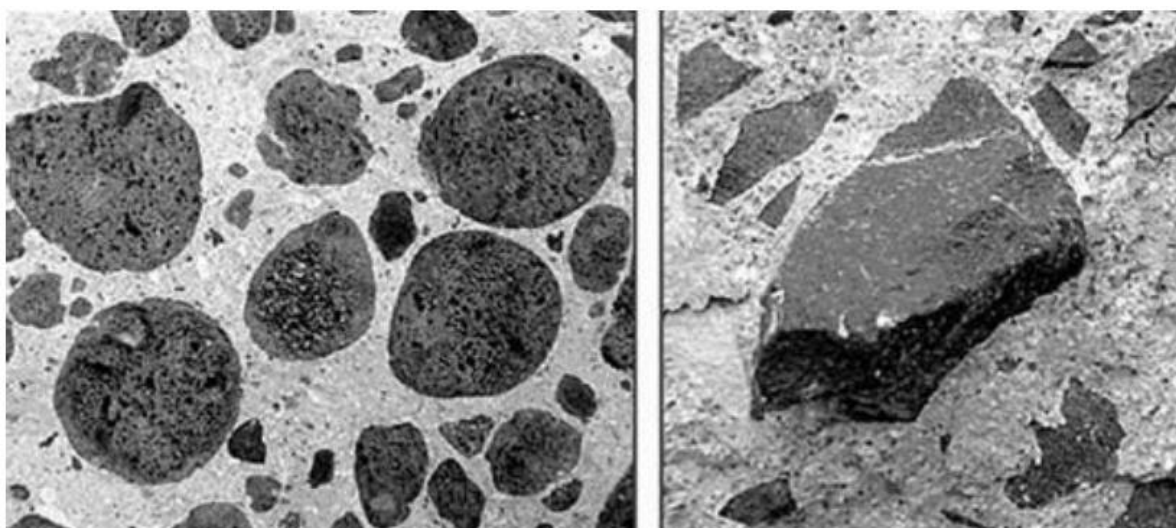
3.4.2.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão e massa específica do concreto leve estão intimamente ligados a fatores como o tipo do agregado leve empregado, a relação

água/cimento utilizada, da mistura e lançamento do material e por fim da cura do concreto (CHANDRA e BERNTSSON, 2002).

Segundo Rossignolo (2003), os agregados convencionais são mais resistentes em relação aos agregados leves, por tanto, a pasta cimentícia passa a exercer papel importante na resistência à compressão de concretos leves. A ruptura dos concretos leves acontece devido ao colapso da pasta cimentícia, ao redor do agregado, ao contrário do que acontece no concreto com agregado convencional, onde a ruptura acontece devido a diferença entre a deformação da pasta e do agregado. EuroLightCon (2000), afirma que a ruptura do concreto com agregado leve atravessa o agregado, e no concreto convencional, os agregados não rompem, por serem bastante resistentes (Figura 13).

Figura 13 - Ruptura característica do concreto com argila expandida (à esquerda) e ruptura característica do concreto com agregado convencional (à direita)



Fonte: Rossignolo e Agnesini (2005)

EuroLightCon (2000) ainda afirma que o concreto com agregado leve apresenta um rápido aumento no seu valor de resistência a compressão, atingindo cerca de 80% logo nos primeiros sete dias de idade, enquanto o concreto convencional apresenta uma evolução mais rápida que o concreto leve após os sete dias de idade.

ACI 213R-03 (2003), constata que ocorre uma perda de água do concreto leve para o ambiente quando moldado, levando a uma redução na sua densidade. A progressão da perda de água varia conforme a característica do concreto, relação área exposta/volume de concreto e fatores ambientais como temperatura, pressão e umidade.

3.4.2.2 Absorção de água e porosidade aparente

Segundo Santos (2012), a porosidade aparente do concreto e porosidade e absorção dos agregados aplicados na mistura são fatores que estão intimamente ligados a absorção de água do concreto, por tanto, concretos com agregado de baixa absorção absorvem menos água quando comparados com concretos que têm agregados com alto teor de absorção.

O concreto leve apresenta baixos valores de relação água/cimento quando comparado com concreto convencional, com resistência à compressão semelhante, por tanto, os concretos leves apresentam menor absorção em relação ao concreto convencional para a mesma faixa de resistência (HOLM e BRENMER, 1994).

4 METODOLOGIA

A argila investigada apresentada neste trabalho é proveniente de um jazida localizada no estado Alagoas, região nordeste do Brasil. A argila Igreja Nova (IN) é proveniente do município de Igreja Nova - AL de Latitude: 10° 7' 13" Sul, Longitude: 36° 39' 39" Oeste. A serragem utilizada foi oriunda da madeira timborana que é utilizada para produção de móveis na cidade de Estância - SE.

Ensaio de caracterização das argilas

4.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Foram coletados cerca de 50 kg da amostra de argila dos depósitos de forma representativa. As amostras foram secas ao ar e, depois, em estufa a temperaturas de (40 ± 10) °C por 48 h. Em seguida sofreram redução granulométrica por meio de moinho de martelo com abertura de grelha de 2 mm e quarteadas. Uma amostra foi separada da argila e passada em peneira ABNT 200 (0,074 mm) para realização de ensaios de caracterização e em peneira ABNT 60 (0,25 mm) para ensaios tecnológicos (AMOROS, 1998).

4.2 PENEIRAMENTO

O método do peneiramento seguido de sedimentação foi utilizado para determinação da distribuição de tamanhos das partículas, em conformidade com as normas, NBR 7181 (2016) e ASTM D422-63 (1998).

4.3 ANÁLISE QUÍMICA POR FRX

Os percentuais dos óxidos constituintes das amostras de argilas foram determinados através de Laboratório externo na UFS. As medidas foram realizadas em vácuo, em um equipamento da marca Bruker, modelo S4 Pioneer, utilizando amostras com massa em torno de 10 g, que foram prensadas no formato de corpos cilíndricos com diâmetro 20 mm e espessura de 3 mm, aproximadamente.

4.4 ÍNDICE DE PLASTICIDADE (IP)

Os limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP) foram obtidos de acordo com a NBR7180:84 e NBR 6459:16. O índice de plasticidade (IP) é o resultado da diferença aritmética entre os limites de liquidez e plasticidade, segundo a Equação (1) abaixo:

$$IP = LL - LP \quad (1)$$

4.5 PERDA AO FOGO

A perda de massa em porcentagem foi determinada pela diferença de peso entre as temperaturas de 100 e 1000 °C de cada amostra queimada em forno com patamar de 2 h (MAHMOUDI et al., 2017).

4.6 MATÉRIA ORGÂNICA

O teor de matéria orgânica foi determinado por meio do processo de calcinação a 440 °C. A matéria orgânica pode influenciar no aumento da plasticidade das argilas, favorecendo a compactação, dificultando a eliminação da água livre, bem como a desidroxilação, podendo gerar deformações nas peças. O teor de matéria orgânica foi determinado segundo a norma a ASTM D 2974.

4.7 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

A difratometria de raios X foi utilizada para a identificação das fases cristalinas de acordo com os padrões obtidos no banco de dados do ICSD (Inorganic Crystal StructureDatabase) e a análise foi realizada utilizando o software Match. Os padrões de difração foram obtidos em um equipamento Rigaku D-MAX 100 usando radiação Cu K α 1 ($\lambda=1,5418$ Å) em modo de varredura contínua, em intervalo angular de 5 a 70° com velocidade de varredura de 1°/min. Para confirmação da fase montmorilonita uma amostra foi saturada com etileno glicol por 1 h afim de observar o aumento da distância interplanar e outra amostra foi calcinada a 550 °C por 2 h. Em seguida, ambas foram analisadas por DRX, no intervalo de varredura de 2 a 15°. A análise foi realizada em duas partes: a fração argila (< 2 μ m) foi separada por centrifugação, em seguida tratada com H₂O₂ para

eliminação de matéria orgânica e com HCl para eliminação de carbonatos. Com o material restante, analisou-se os acessórios (GOLIAS et al., 2012).

4.8 CONFORMAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA E ENSAIOS TECNOLÓGICOS DAS ARGILAS

As argilas foram passadas na peneira ABNT 16 (1,18 mm) para ajuste de granulometria. Numa proporção de 5%, 10% e 20%, foi misturada serragem granulada passada na peneira ABNT 50 (0,297 mm), em seguida foram misturadas em misturador mecânico. Após a mistura, foi granulada com umidade de cerca de 7% e armazenadas por 24 h. Foram conformados corpos de prova cilíndricos com dimensões de (20 x 20) mm em uma prensa manual com pressão uniaxial de compactação aproximadamente de 60 MPa, a fim de obter uma densidade aparente entre 2 e 2,2 g/cm³.

Os corpos de prova prensados foram todos eles identificados, medidos com paquímetro analógico com precisão de 0,05 mm e pesados em balança eletrônica da marca DIGIMET, modelo KN-500, com precisão de 0,01 g para determinação da retração linear de secagem (Rls), retração total (Rtq) e massa específica aparente (Mea). Os corpos de prova de argilas e das formulações de massas foram secos inicialmente ao ar livre por 24 h e depois em estufa a (100±5) °C, até apresentarem peso constante.

Todos os corpos de prova foram colocados em dessecador para resfriamento, e em seguida foram medidos, pesados, seguindo os mesmos critérios dos corpos de prova a verde (AMOROS, 1998).

4.9 ENSAIOS TECNOLÓGICOS APÓS QUEIMA

A etapa de queima foi realizada em forno da marca JUNG, modelo LF 0612 na UFS. As argilas foram queimadas a 1080, 1100 e 1120 °C e foi programado patamar de 20 min na temperatura de 600 °C com o fim de garantir a dissociação da matéria orgânica e eliminação da água de desidroxilação das argilas. Após 600 °C foi estabelecido a taxa de 20 °C/min e patamar na maior temperatura de 20 minutos, com o fim de garantir a absorção de água, resistência mecânica e massa específica aparente desejadas. Foram utilizados cinco corpos de prova para cada

temperatura de queima e o ensaio foi repetido por duas vezes, totalizando dez corpos de prova em cada etapa.

4.10 ABSORÇÃO DE ÁGUA (AA) E MASSA ESPECÍFICA APARENTE (MEA)

Após queima, os corpos de prova foram caracterizados por meio da absorção de água (AA) com imersão em água por 24 h segundo a norma ASTM C-20 (2005), cujos resultados podem ser expressos pela Equação (2), em que m_1 é a massa seca e m_2 a massa saturada:

$$AA = \frac{(m_2 - m_1)}{m_1} * 100 \quad (2)$$

Foi ainda determinada a massa específica aparente (Mea) dos corpos sinterizados, usando o picnômetro de Hélio.

4.11 TENSÃO DE RUPTURA À COMPRESSÃO APÓS QUEIMA

A tensão de ruptura à compressão (TRC) foi realizada com os corpos de prova já secos em estufa queimados e em um tensiômetro da marca Contenco, modelo HD 200T com velocidade de aplicação de carga de 2 mm/min, seguindo a norma ASTM C-63, cujos resultados podem ser expressos pela Equação (3).

$$TRC = \frac{P}{A} \quad (3)$$

4.12 PRODUÇÃO DO CONCRETO COM O AGREGADO OBTIDO

No processo de mistura dos materiais, foi inicialmente colocado na betoneira as argilas e/ou britas, em seguida areia, metade da água e cimento. Promoveu-se a mistura por cerca de um minuto e finalmente o restante da água. Em função da elevada absorção de água que os agregados de argila expandida exercem, e para compensar esse efeito, foi realizado um pré-umedecimento dos agregados imergindo em água por 24 h antes de serem utilizados na concretagem. Após o amassamento, foi realizado o ensaio de abatimento do tronco cone segundo a NBR MN 67/1998, em que se obteve um *slump* de cerca de 80 mm. Para cada traço

foram moldados cerca de 3 corpos de prova. Após 24 h, desmoldados e imersos em água onde permaneceram por 28 dias.

4.13 ENSAIO DE COMPRESSÃO DE CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS

A tensão de ruptura à compressão (TRC) dos corpos de prova de concreto foi obtida através das mesmas normas, fórmulas e tensiômetro dos corpos de prova de argila expandida após a queima (4.1.).

5 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

Para produção da argila expandida foi utilizada uma argila denominada IN do município de Igreja Nova, estado de Alagoas. De acordo com Cabral (2008), a composição química de uma argila para produção de argila expandida deve atender à seguinte faixa: (%) de SiO_2 de 50 a 65, (%) de Al_2O_3 de 16 a 20, (%) de CaO de 1 a 4, (%) de Fe_2O_3 de 5 a 9, (%) de MgO de 1,5 a 3,5. De acordo com a Tabela 2, a argila apresenta elevado teor de álcalis $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (5,7%) os quais acima de 3% atuam como óxidos fundentes favorecendo a redução da temperatura de queima, além de contribuir para formação de fase líquida com consequente aumento da resistência mecânica e redução da absorção de água do agregado (SANTOS, 1989). Os demais óxidos, como SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 atendem às especificações de (CABRAL, 2008).

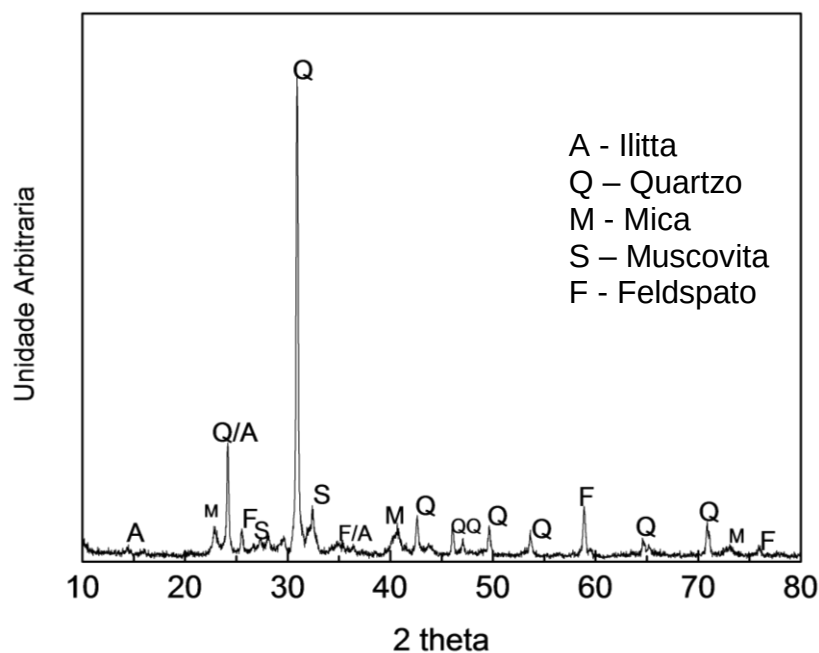
Tabela 2 - Análise química da argila (%)

Argila	PF	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	Na_2O	MgO	TiO_2
IN	5,00	63,80	15,92	0,66	5,21	4,26	1,51	2,62	0,76

Fonte: Autor (2019)

A análise de difratometria de raios X das argilas utilizadas no trabalho é apresentada na Figura 14. A argila apresenta majoritariamente o mineral quartzo (JCPDS 96101-1160), como também o argilomineral illita (JCPDS 96900-9666) que fornece os óxidos K_2O que favorecem a sinterização durante a queima. Em menor proporção o difratograma apresenta ainda o acessório muscovita (JCPDS 96101-1059), que fornece os óxidos Na_2O e K_2O , além do quartzo (JCPDS 96101-1160), que juntamente com os demais óxidos formam fase vítrea que preenchem os poros, conferindo a densificação da massa após queima formando as fases feldspato e muscovita (CELIK, 2010).

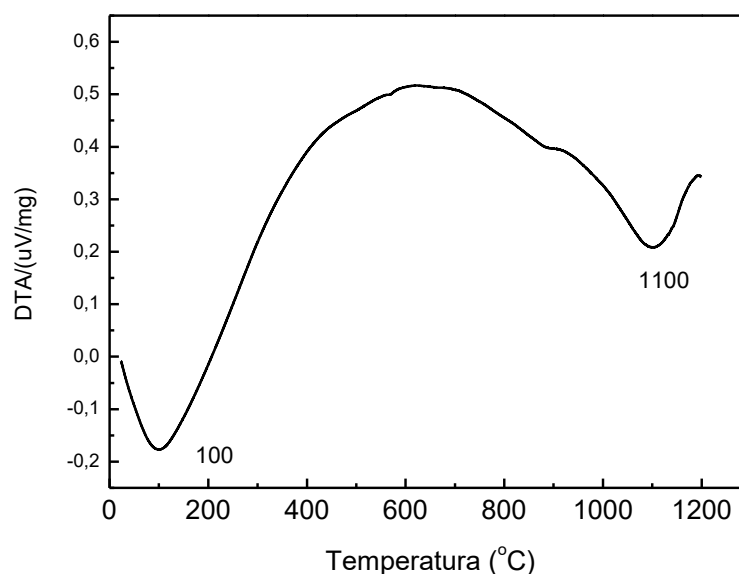
Figura 14 - Padrões de difração de raios X das argilas estudadas.



Fonte: Autor (2019)

A Figura 15 apresenta a curva de DTA da argila IN. Foi observado pico endotérmico a cerca de 100 °C que segundo Celik (2010), Santos (1989), é perda de água adsorvida. Pode ocorrer ainda perda de hidroxilas nas argilas até 700 °C o que é comum. Foi ainda observado por volta de 900 °C início da sinterização através de um pico endotérmico e outro pico característico da pré-cristalinização da mulita a 1100 °C (LIMA, 2016).

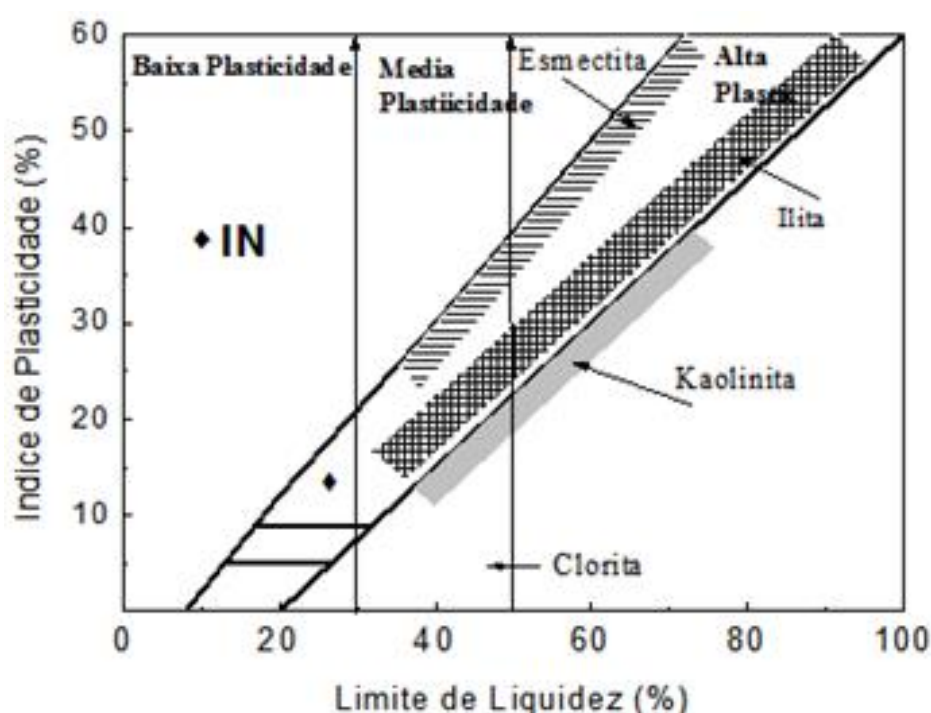
Figura 15 - Análise Térmica Diferencial das formulações padrão



Fonte: Autor

Na Tabela 3 estão apresentados os resultados de caracterização física. O valor de IP médio foi de cerca de 9%, considerado média plasticidade (CAPUTO, 2011), mas suficiente para conformação de produtos de cerâmica. A plasticidade ótima é aquela mínima necessária para que o processo de conformação se realize, não gerando problemas posteriores como deformações, reduzindo a resistência mecânica das peças verdes ou secas (DOMENECH, 1994). O índice de plasticidade (IP) pode ser classificado como baixo quando $IP < 7\%$, média plasticidade cujos resultados oscilam entre 7 e 15% e altamente plástica $IP > 15\%$ (MAESTRELLI, 2013). A argila IN apresenta médio índice de plasticidade devido provavelmente devido ao elevado teor de quartzo e minerais acessórios como muscovita identificados no difratograma de raios X. A classificação da argila segundo Holtz e Kolvac está representada na Figura 16 onde, através do diagrama, e resultado dos ensaios de índice de plasticidade e limite de liquidez, é possível definir a classificação do material.

Figura 16 - Diagrama Holtz e Kolvac da argila investigada



Fonte: Bennour (2015)

Na distribuição granulométrica das argilas conforme discutido por Celik (2010), a fração de finos menores que $2\ \mu\text{m}$ confere maior área específica, favorecendo o desenvolvimento da plasticidade, obtendo-se maior resistência mecânica dos corpos conformados a verde e, proporcionalmente, melhora a

sinterização e a resistência mecânica após queima. Já o teor de matéria orgânica é considerado elevado para ciclos de queima rápido.

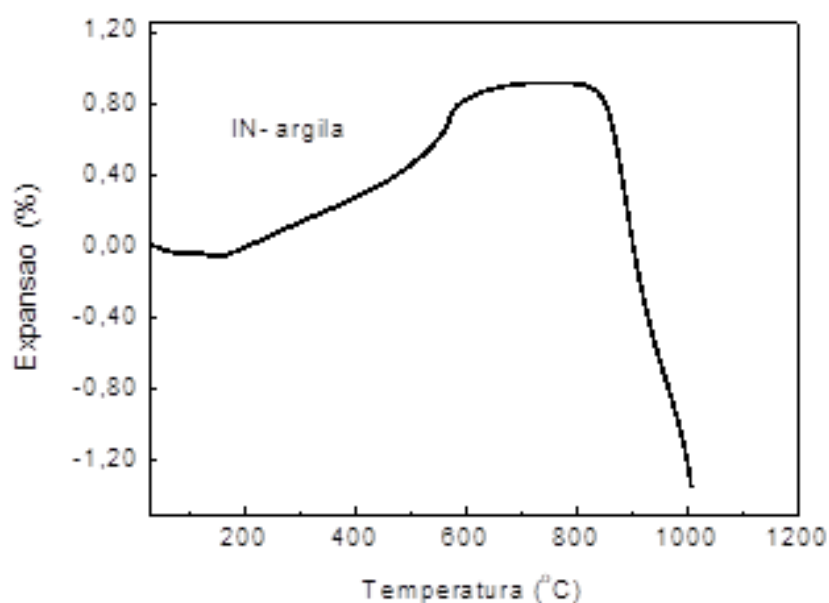
Tabela 3 - Caracterização física da argila

Amostra	IP (%)	Argila< 2(μ m)	Silte2- 60(μ m)	Areia> 60(μ m)	MO (%)	ME (g/cm ³)
IN	9	39,7	39,2	21,1	1,4 $\pm$ 0,2	2,710 $\pm$ 0,003

IP - índice de plasticidade; MO - matéria orgânica; ME - massa específica. Fonte: Bennour (2015)

Na Figura 17 é apresentada a análise dilatométrica da argila, a qual apresenta expansão com redução da densificação na faixa de temperatura 25 a 800 °C, devido à eliminação da água adsorvida, desidroxilação das argilas, e ainda, dissociação de matéria orgânica (MACKENZIE, 1959 apud OLIVEIRA, 2017; ZAIED, 2015). Na temperatura próxima de 573 °C, é observada a transformação alotrópica do quartzo α para β na argila (MACKENZIE, 1959 apud OLIVEIRA, 2017). Nesta faixa de temperatura, é fundamental o cuidado na queima para evitar trincas nas peças tanto na fase de pré-aquecimento como na fase de resfriamento dos produtos cerâmicos (ARAB, 2015). A aproximadamente 800 °C, foi observado o início da sinterização na argila, com aumento da densificação, seguido de retração devido à formação de fase vítrea.

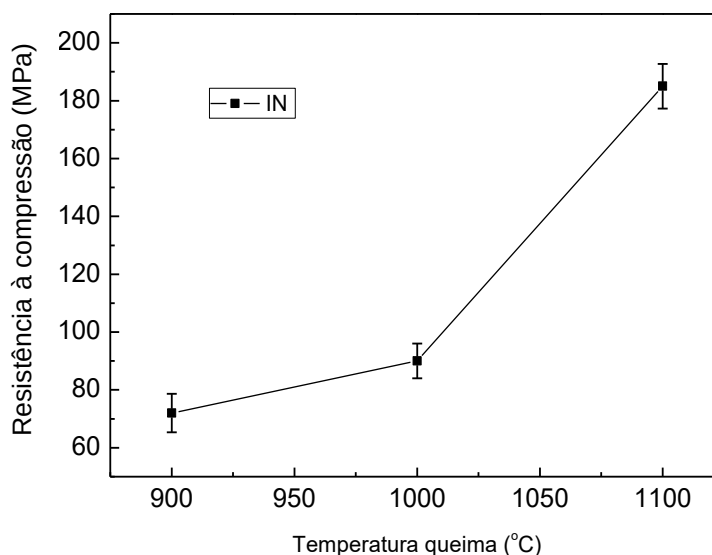
Figura 17 - Análise dilatométrica da argila



Fonte: Autor (2019)

Na Figura 18 é apresentado a resistência mecânica à compressão da argila queimada nas temperaturas 900, 1000 e 1100 °C. Foi observado que a resistência obtida com a argila estudada foi similar a das britas comerciais estudadas por Isaia (2015).

Figura 18 - Resistência mecânica à compressão



Fonte: Autor (2019)

Inicialmente, foram definidas formulações para produção de argila expandida, comparados com o único fornecedor de argila expandida do Brasil denominados de Arg Exp (padrão).

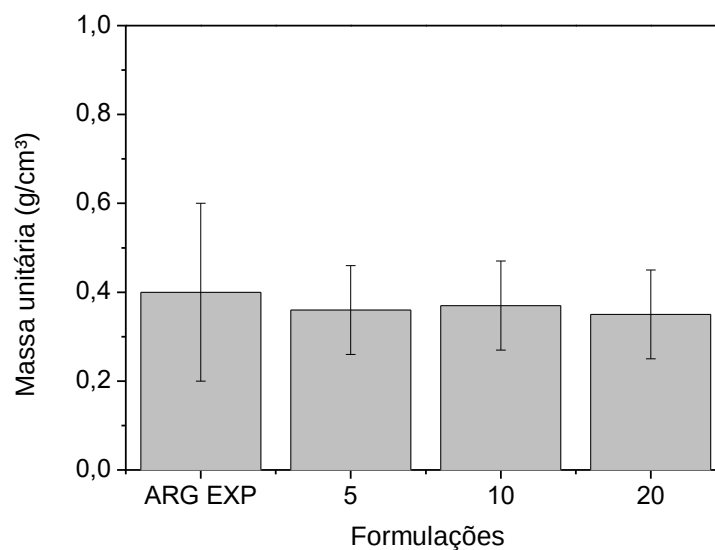
Foram produzidos corpos de prova e foram submetidos a ensaios para determinar sua resistência à compressão e sua massa específica. De acordo com a Tabela 4 foram incorporados à argila resíduos de serragem, que após queima a 1120 °C se decompõe e liberam CO₂, deixando microporos, que aumentam o volume do agregado e favorecendo a diminuição da densidade do mesmo (BOUSSEN, 2016).

Tabela 4 - Formulações para produção de argila expandida (%)

Matéria Prima	Padrão	5	10	20
Argila Expandida ¹	100			
Argila IN	-	95	90	80
Serragem	-	5	10	20

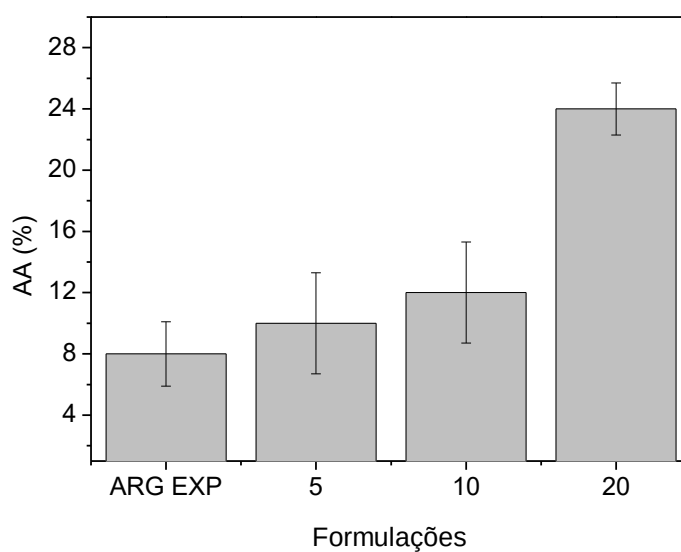
¹Argila expandida do mercado da CINEXPAN. Fonte: Autor (2019)

Os resultados da densidade aparente (massa unitária) estão apresentados na Figura 19. A densidade aparente da argila expandida (padrão) é similar as demais. Não foi observado diferenças significativas.

Figura 19 - Massa unitária das formulações de argila expandida

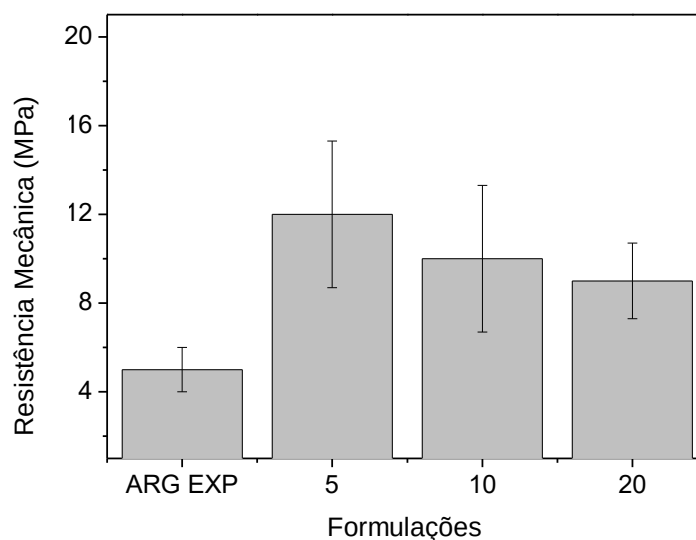
Fonte: Autor (2019)

Os resultados de absorção de água (AA) e da tensão de ruptura à compressão (TRC) estão apresentados nas Figuras 20 e 21 respectivamente. A resistência é maior do que a argila expandida do mercado em todas as formulações. Por sua vez, à medida que a concentração de serragem aumentou, a absorção de água aumentou, devido à perda de massa, que gera maior número de vazios. As formulações com 5 e 10% apresentaram absorção próximo ao padrão.

Figura 20 - Absorção de água das formulações

Fonte: Autor (2019)

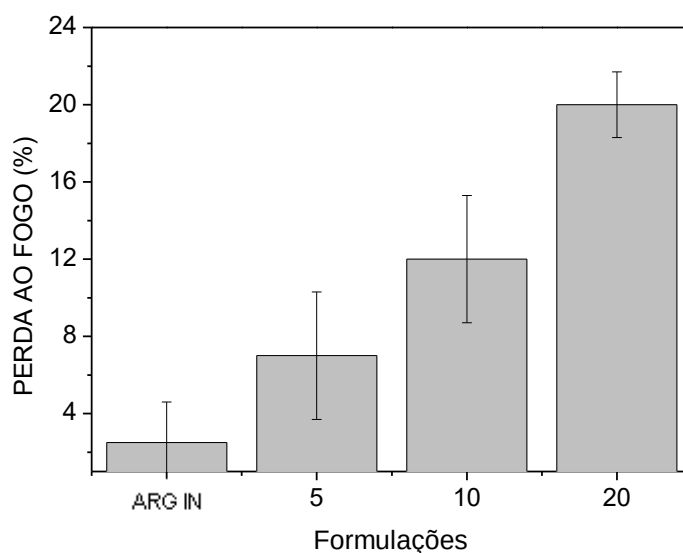
Figura 21 - Tensão de ruptura à compressão das formulações de argila expandida



Fonte: Autor (2019)

De acordo com a Figura 22 a perda ao fogo foi aumentando a medida em que se acrescentou a serragem. A maior perda ao fogo foi observada na formulação com 20% de incorporação de serragem.

Figura 22 - Perda de massa das formulações



Fonte: Autor (2019)

Para escolha da formulação ideal, ou seja, que apresentasse maior resistência mecânica à compressão e menor massa unitária, foi utilizada a técnica de decisão com vários objetivos apresentada na Tabela 5. Nesse procedimento é atribuído ao item de maior valor a unidade um, e ao de menor valor agregado o

valor zero. Os demais são obtidos por interpolação (YU, 2016). Assim, a fórmula escolhida para produção efetiva dos agregados para produção de concreto foi a contendo 5% de serragem.

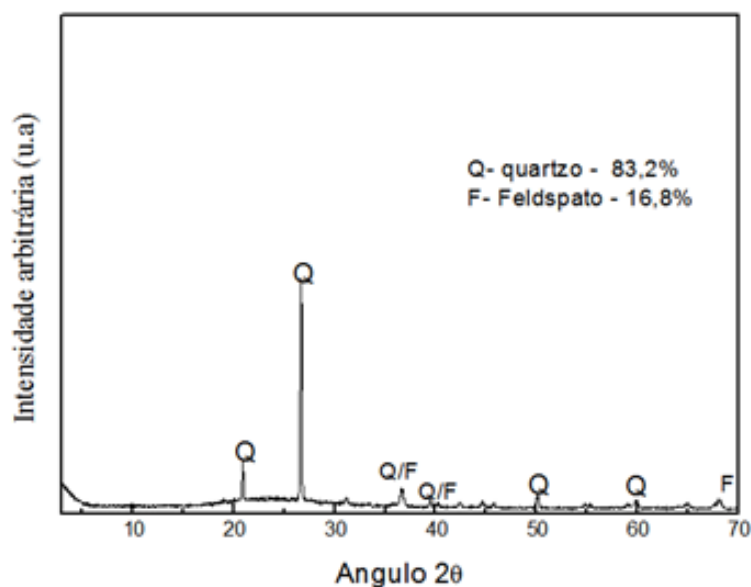
Tabela 5 - Técnica da decisão com vários objetivos

Fórmulas	Resistência à compressão (MPa)	Massa unitária (kg/m³)	Utilidade média
5	11,4 (1,00)	390 (1)	1,00
10	9,6 (0,33)	470 (0)	0,33
20	8,9 (0)	450 (0,33)	0,33

Fonte: Autor (2019)

Após queima a 1120 °C foi realizado ensaio de difratometria de raios DRX da argila expandida da formulação com 5% de serragem, conforme apresentado na Figura 23 que mostra a predominância de quartzo seguido do feldspato.

Figura 23 - Padrão de difratometria de raios X da argila expandida queimada



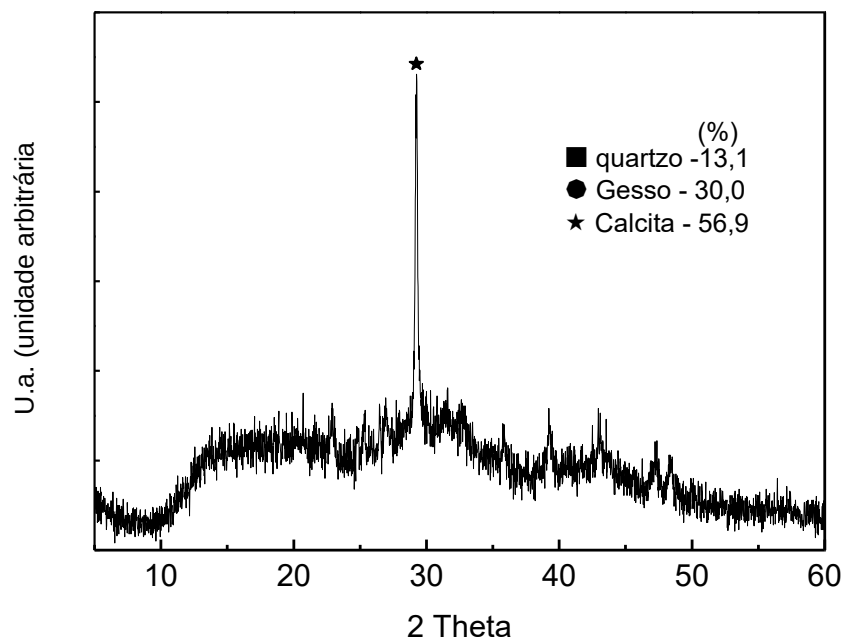
Fonte: Autor (2019)

A análise química conforme mostrada na Tabela 6 foi baseada nos trabalhos de Borlini (2017). Conforme apresentado as cinzas de modo geral são ricas em Si e Ca. Adicionalmente, a difratometria de raios X realizada (Figura 24), comprova a presença de quartzo, Ca na forma de gesso e calcita formada provavelmente devido à hidratação do Ca com umidade do ar (BORLINI, 2017).

Tabela 6 - Análise química da serragem (%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	CaO	MnO ₂	Cl	SO ₃	P ₂ O ₅	SrO	PF
16,9	2,7	0,8	7,0	7,2	32,6	0,39	0,15	4,4	3,7	0,27	21,5

Fonte: Borlini et al (2005)

Figura 24 - Padrão de difratometria de raios X da serragem

Fonte: Autor (2019)

Na Tabela 7 é apresentada as características tecnológicas das matérias primas utilizadas na pesquisa. Foi observado que não existe diferença significativa nos valores de massa específica, massa unitária e absorção de água entre a argila expandida do mercado considerada padrão e a produzida.

Tabela 7 - Propriedades tecnológicas das matérias primas

Matérias primas	Massa específica (kg/m ³)	Massa unitária (kg/m ³)	Absorção de água (%)
Cimento	3100	1100	-
Areia média	2650	1520	-
AE 19 mm	880	440	12,0
AE15 mm	1100	540	9,0
AE 19 mm ¹	1115	450	8,0

¹Argila expandida do mercado da CINEXPAN. Fonte: Autor (2019)

Na Tabela 8 é apresentada a formulação de argila expandida (em traço e em kg/m³) adotada comparada com uma formulação padrão com brita. Foi notado que o consumo de cimento sofreu um pequeno aumento em relação a padrão. Em

relação ao consumo de areia, houve um grande aumento, devido à baixa massa unitária da argila em relação a brita.

Tabela 8 – Composição das formulações de concreto

Constituintes	Traço		Kg/m ³	
	Padrão	Argexpan (AE)	Padrão	Argexpan (AE)
Cimento CP IV	1	1	530	560
Areia lavada	2	2	857	1740
Brita zero	3		730	-
AE Ø19 mm		1,5	-	244
AE Ø15 mm		1,5	-	292
água			263	280
a/c			0,50	0,50

Fonte: Autor (2019)

Na Tabela 9 é apresentado os resultados de resistência mecânica e massa específica aparente. A resistência da argila expandida apresentou-se baixa sendo recomendada somente para concretagem de elementos não-estruturais. A baixa resistência se deve a necessidade de melhor arranjo granulométrico conforme outros trabalhos (SANTIS, 2015 e OLIVEIRA, 2017).

Tabela 9 - Resultados obtidos dos corpos de prova

Traços	Dias	Resistência mecânica à compressão (MPa)	Massa específica (kg/m ³)	Resistência/Massa
Padrão	28	28,0±1,0	2400	0,0117
AE	28	9,5±0,5	1720	0,0055

Fonte: Autor (2019)

Foi observado redução do peso (massa) do agregado produzido com serragem em cerca de 28% em relação ao traço padrão composto por brita. Fazendo uma relação entre a resistência e massa específica, foi observado que, aproximadamente, a relação do traço padrão é maior duas vezes quando comparado com o traço composto por argila expandida com serragem.

6 CONCLUSÕES

Foi observado que a formulação com menor massa unitária foi a com 5% de serragem, sendo menor inclusive que a argila expandida comercial. Além disso, todas as formulações com adição de serragem apresentaram resultados no ensaio de resistência à compressão maiores que a argila já presente no mercado. Por outro lado, notou-se que todas as formulações absorveram mais água que a argila adotada como padrão, isso deve-se ao fato da argila com adição de serragem apresentar mais vazios, deixados pelo pó da serragem que se extinguiu após a queima. Assim como os valores de absorção, os valores de perda ao fogo aumentaram proporcionalmente com a concentração de serragem.

Através da aplicação da técnica da decisão com vários objetivos, obtemos o melhor resultado com a formulação com 5% de serragem apresentando 1,00 de utilidade média.

O valor obtido com os corpos de prova no ensaio de resistência à compressão foi bem abaixo do padrão, porém isso é atribuído ao fato de ter sido produzido apenas dois diâmetros com o agregado leve, portanto, não houve um fator de empacotamento adequado, contudo, o valor da massa específica classifica o mesmo como um concreto leve. Além disso, foi observada uma redução de 28% no peso do concreto produzido com o agregado de argila expandida com adição de 5% de serragem. Além disso, as resistências obtidas por todas as formulações de argila expandida produzidas, foram maiores do que da argila expandida do mercado.

Adicionalmente, a reciclagem de resíduos é uma grande oportunidade nesse segmento, sobretudo utilizando materiais que se extinguem durante a queima melhorando propriedades como porosidade e massa específica do material.

REFERÊNCIAS

- ABCERAM (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA). **Matérias Primas Naturais**. São Paulo, 2016. Disponível em: <https://abceram.org.br/materias-primas-naturais/>. Acesso em: 29 mar. 2019.
- AL-SIBAHY, Adnan; EDWARDS, Rodger. **Mechanical and thermal properties of novel lightweight concrete mixtures containing recycled glass and metakaolin**. Construction and Building Materials, Reino Unido, n. 31, p. 157-167, 2012.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. **Guide for structural lightweight aggregate concrete**. ACI – 213R-03. ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, 27p., 2003.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **ASTM C-20-2005: Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water**. 2005.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **ASTM D 2974-1992: Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Organic Soils**. 1992.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **ASTM D422 – 63- 1998: Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils**. 1998.
- AMOROS, J.L., SANCHES, G., JAVIER. **Manual para el control de localidad de materias primas arcillosas**. 3ª Edição, Madrid, ITC, Instituto de Tecnología Cerámica. 1998.
- ANDRADE, F.A., H.A.; AL-QURESHI. **Measuring the plasticity of clays: A review**. Applied Clay Science, v.51, pp.1–7, 2011.
- ARAB, P. B., PEJON, O. J. **Identification of clay minerals in mixtures subjected to differential thermal and thermogravimetry analyses and methylene blue adsorption tests**. Applied Clay Science, 114, pp. 133-138. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7250:1982, Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, p. 5, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004, Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, p. 71, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459, Determinação do limite de plasticidade de solos**. Rio de Janeiro, p. 5, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180, Determinação do limite de liquidez de solos.** Rio de Janeiro, p. 3, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181, Determinação do índice de granulometria.** Rio de Janeiro, p. 7, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7250/82 – Identificação e Descrição de Amostras de Solo em Sondagens de Simples Reconhecimento dos Solos.** Rio de Janeiro, p. 3, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953 – Concreto para fins estruturais – Classificação por grupo de resistência.** Rio de Janeiro, p. 3, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação por grupos de resistência.** Rio de Janeiro, p. 3, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 35 – Agregados leves para concreto estrutural - Especificações.** Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67:98, Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, p. 8, 1998.

BARBA, A. **Materias Primas para la Fabricacion de Soportes Baldosas Cerâmica.** Instituto de Tecnologia Cerámica, AICE 1ª ed. Castellon Espanha, p.239-255. 1997.

BELTRAN, V.; FERRANDO, E.; GARCIA, J.; SANCHEZ, E. 1995 **Extruded Rustic Floor Tile I. Impact of the Composition on the Body's Behavior in the Prefiring Process Stages.** Tile & Brick International, v.11, n. 3, pp. 169-176. 1995.

BERNHARD, T. M., JUSTNES, H., TELLESBØ, H., WIILK, K. **The effect of additives on the properties of lightweight aggregates produced from clay.** Cement & Concrete Composites, v.53, pp.233–238. 2014.

BORLINI, M. C.; SALES, H. F.; VIEIRA, C. M. F.; CONTE R. A.; PINATTI, D. G. MONTEIRO, S. N. **Cinza da lenha para aplicação em cerâmica vermelha.** Universidade Estadual do Norte Fluminense. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ce/v51n319/26791.pdf>>. Acesso em: 19/03/2019.

BOUSSEN, S., D. Sghaqier, F. Chaabani, B. Jamoussi, A. Bennour. **Characteristics and industrial application of the lower cretaceous clay deposits (Buhedma formation), southeast Tunisia: Potential use for the manufacturing of ceramic tiles and bricks.** Applied Clay Science, v. 123, pp. 210-221. 2016.

BUI, L. L. A. T. **Development of lightweight aggregate from sewage sludge and waste glass powder for concrete.** Construction and Building Materials, v. 47, pp.334–339. 2013.

CABRAL, E. M., SÁ, R. J., VIEIRA, R. K., et al. **Utilização de massas cerâmicas na produção de agregado sintético de argila calcinada para uso em concreto.** *Cerâmica*, 54, pp. 404-410. 2008.

CELIK, H. **Technological characterization and industrial application of two Turkish clays for the ceramic industry.** *Appl. Clay Sci.*, 50, 245–254, 2010.

CHANDRA, S. BERNTSSON, L.. **Lightweight aggregate concrete: Science, technology, and applications.** Noyes Publications. USA, 9, pp.409. 2002.

CHRISTOGEROU.A. KAVAS, T. **Synergy of boron containing solid Wastes and fructose for the production of light weight aggregates: microstructure and properties.** *WasteBiomass*, v.5, pp.1453-1461. 2014.

CINEXPAN. Disponível em <http://www.cinexpan.com.br/>. Acessado em 15.08.2018

COELHO, Antonio C. Vieira; SANTOS, Pêrsio de Souza e SANTOS, Helena de Souza. **Argilas especiais: o que são, caracterização e propriedades.** *Quím. Nova* [online]. vol.30, n.1, pp.146-152, 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-EM 230, Agregado sintéticos graúdos de argila calcinada.** Sem local, p. 3, 1994.

DOMENECH, V. SANCHEZ, E. **Estimacion de la plasticidade de massas cerâmicas mediante ladeterminacion de la fuerza de identation.** *Qualicer*, Espanha, p. 61-70. 1994.

DUTRA, Reinaldo I. J. P.; NASCIMENTO, Suziane M. do. **Resíduos De Indústria Madeireira: Caracterização, Consequências Sobre o Meio Ambiente e Opções de Uso.** Reinaldo. *Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal*, [S.L.], 2005.

ESCSI – EXPANDED SHALE, CLAY AND SLATE INSTITTUTE. **Lightweight Concrete: history, applications and economics.** USA, ESCSI Publications, 43p. 1971.

EUROLIGHTCON – Economic Design and Construction with Lightweight Aggregate Concrete. **Light WeightAggregate.** Project BE96-3942/R15, Noruega, 25p. 2000.

FAGUNDES, H. A. V. **Produção de madeira serrada e geração de resíduos do processamento de madeira de florestas plantadas no Rio Grande do Sul** [dissertação]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2003.

FONTES, P. J. P.,. **Auto-Suficiência Energética em Serraria de Pinus e Aproveitamento dos Resíduos.** Dissertação de Mestrado do curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1994.

GOLIAS, M., CASTRO, J., WEISS, J., et al., **The influence of the initial moisture content of lightweight aggregate on internal curing**, *Construction and Building Materials*, Elsevier, v.35, pp. 52–62, 2012.

GOMES, C.F. **Argilas o que são e para que servem**. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Portugal. 1988.

LIMA, L. K . S. et al. **ESTUDO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE ARGILAS NA FORMAÇÃO DE NOVAS FASES CRISTALINAS EM MATERIAIS CERÂMICOS**. 22º CBECiMat, Natal - RN, 2016. Disponível em: <http://www.metallum.com.br/22cbecimat/anais/PDF/104-029.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2019.

HOFF, G. C. **Guide for the of low-density concrete civil works projects**. Innovations for navigation projects research program. U.S. Army Corps of Engineers, Washington – DC, 2002.

HOLM, T. A., BREMNER, T. W. **High strength lightweight aggregate concrete**. High performance concrete: properties and applications. New York, McGraw-Hill. Cap. 10, p. 341-374, 1994.

ISAIA, G. C.; **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. IBRACON, São Paulo, 2015.

MAESTRELLI, S. C.; ROVERI, D.; NUNES A. et al. **Estudo da caracterização de argilas não plásticas da região de poços de caldas**. Cerâmica, v.59, n. 350, 2013.

MAHMOUDI, S.; BENNOUR A.; SRASRA, E., ZARGOUNI, F. **Characterization, firing behavior and ceramic application of clays from the Gabes region in South Tunisia**. Applied Clay Science. v. 135, pp. 215–225.2017.

MESEGUER, S., PARDO, F., JORDAN, M.M. et al. **Ceramic behavior of five Chilean clays which can be used in the manufacture of ceramic tile bodies**. Applied Clay Science, v. 47, pp. 372–377. 2010.

MORAVIA, W. G.; OLIVEIRA, C.A.S., GUMIERI, A. G. et al. **Caracterização microestrutural da argila expandida para aplicação como agregado em concreto estrutural leve**. Cerâmica ,52, pp.193-199. 2006.

MORENO, M. M. T.; ZANARDO, A.; ROCHA, R. R. e ROVERI, C. D. **Matéria-prima da formação Corumbataí na região do polo cerâmico de Santa Gertrudes, SP, com características naturais para fabricação de argila expandida.** Cerâmica [online], vol.58, n.347, pp.342-348. 2012.

NORTON, F. H. **Cerâmica Fina. Tecnologia y Aplicaciones.** Barcelona: Ediciones Omega, S.A.1975.

OLIVEIRA, H. A. de. **Avaliação de argilas industriais formuladas com resíduo de vidro na produção de agregado sintético.** 2017. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Sergipe, Aracaju, 2017.

QUAHABI, M. E., DAOUDI, L., FAGEL, N. **Mineralogical and geotechnical characterization of clays from northern Morocco for their potential use in the ceramic industry.** Clay Minerals, v.49, pp. 35-51, 2015.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos – Dosagem, produção, propriedades e microestrutura.** Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo - USP, São Carlos – SP, 211p., 2003.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve estrutural: Produção, propriedades, microestrutura e aplicações.** 1 ed., São Paulo, Ed. PINI, 2009.

ROSSIGNOLO, João Adriano; AGNESINI, Marcos Vinicio Costa. **Concreto leve estrutural.** In: Concreto: ciência e tecnologia [S.l: s.n.], v. 2, 2011.

ROSSIGNOLO, João Adriano; AGNESINI, Marcos Vinicio Costa. **Concreto leve estrutural.** In: ISAIA, G. C. (Ed.) Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo, IBRACON, v. 2, p. 1333-62, 2005.

SANTIS, B. C. **Agregado leve de argila calcinada para uso em concreto estrutural: viabilidade da cerâmica vermelha do estado de São Paulo.** 2012. 132 p. Dissertação (Mestrado). Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SANTIS, B.C.; ROSSIGNOLO, J.A.. **Influence of calcined clay lightweight aggregates on the mechanical properties of structural concretes.** Revista Matéria, v. 20, n. 2, 399–406. 2015.

SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologia das Argilas.** 2 ed. Ver. Atual. Volume 1. São Paulo. Editora Edgard Blucher Ltda. 496 p. Il. 1989.

SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologia das Argilas.** 2 ed. Ver. Atual. Volume 2. São Paulo. Editora Edgard Blucher Ltda. 496 p. Il. 1989.

SILVA, Cândida Pereira da et al. **Quantificação de Resíduos Produzidos nas Indústrias Madeireiras de Gurupi, TO.** Floresta e Ambiente, [S. l.], 2017.

SLEVIN, R. **Characterizing Ceramics During the Drying Process**. Horrop Industries, Inc. Columbus, Ohio, pp. 56-63. 2002.

TAKAHASHI, Elisa Akiko Nakano. **Utilização da escória de alumínio na fabricação de argila expandida**. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência de Materiais, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2006.

VOLLAND, S., KAZMINA O., VERESHCHAGIN V., DUSHKINA M. **Recycling of sand sludge as a resource for lightweight aggregates**. Construction and Building Materials, v. 52, pp. 361–365. 2014.

YU S.O. ABRANHAM. **Tomada de Decisão nas Organizações: Uma Visão Multidisciplinar**. São Paulo, 2016.

ZAIED, F. H., ABIDI, R., SLIM-SHIMI, N., SOMARIN, A. K. **Potentiality of clay raw materials from Gram area (Northern Tunisia) in the ceramic industry**. Applied Clay Science, v.1, pp. 112-113, 2015.

ZHANG, M. N. e GJφRV, O. E. **Mechanical Properties of High-Strength Lightweight Concrete**. ACI Materials Journal, v. 88, n. 3, p. 240-247, 1991.